平成２４年度　経済産業省委託

石油精製業保安対策事業

（高圧ガス取扱施設における地震・津波時の対応に関する調査）

（３）津波の波力、設備の浮力、漂流物の影響等の評価手法の検討

報告書

平成２５年２月

高圧ガス保安協会

まえがき

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以下、「東日本大震災」という。)においては、一部の高圧ガス設備で火災・爆発等が発生し、社会的に大きく扱われた事故が発生したほか、津波浸水区域で、様々な高圧ガス設備や容器の損壊、流出等が発生した。

このため、昨年7月より総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会高圧ガス部会を5回開催し、東日本大震災による高圧ガス施設等の地震・津波による被害の調査・分析に基づき、今後の高圧ガス分野における地震・津波対策について検討を行い、「東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について」(以下、「報告書」という。)を取りまとめ、平成24年4月27日に公表されたところである。また、今後、この方向性に基づき、具体的な方策、基準等の検討や、事業者による取り組みの促進といった対策の具体化を推進していく必要があると述べられている。

高圧ガス設備の津波対策については、津波により破損、流出する可能性がある設備を抽出するため、設備が波力、浮力及び漂流物により受ける影響を評価するための手法を新たに検討する。ただし、高圧ガス設備の形状、種類は多種多様であり、全ての設備を一定の手法で評価することは困難であることから、貯槽本体、貯槽と緊急遮断弁との間の配管等、破損、流出が周辺地域に与える影響が大きいと考えられる設備について優先的に検討を行うことが示されている。

上記報告書に基づき、高圧ガス保安協会では「高圧ガス施設の津波対策検討調査委員会」を設置し、高圧ガス取扱施設における地震・津波対応に関する調査を実施し、その結果をとりまとめた。

最後に、本委員会の活動にあたっては、ご多忙のところ、熱心に取り組んでいただいた委員長及び委員の方々、並びに関係機関及び業界からの献身的なご協力をいただき、心から御礼申し上げます。

高圧ガス保安協会
理事　安田慎一

高圧ガス施設の津波対策検討調査委員会　委員名簿（敬称略、委員長以下五十音順）

【委員長】
澤俊行　　広島大学　産学・地域連携センター長　名誉教授

【委　員】
石塚静夫　　ＪＸ日鉱日石エネルギー㈱　製造技術本部　製造部　副部長
〔石油連盟〕

因幡和晃　　東京工業大学　大学院理工学研究科　機械物理工学専攻　准教授

茨田高志　　㈱ＩＨＩ　プラントセクター　企画管理部　VE推進グループ　主査

宇野義明　　日揮㈱　エンジニアリング本部　ＥＮテクノロジーセンター
構造解析グループ　プリンシパルエンジニア（H24.11.29から）

大谷英雄　　横浜国立大学　大学院環境情報研究院
人工環境と情報部門安全管理学分野　教授

島谷高志　　日揮㈱　エンジニアリング本部　装置エンジニアリング部
グループマネージャ（H24.11.28まで）

木全宏之　　清水建設㈱　土木技術本部　設計第二部　設計技術グループ　グループ長

橋本孝之　　旭化成ケミカルズ㈱　川崎製造所 設備管理部 ポリマー設備管理課　課長
〔石油化学工業協会〕

花田泰秀　　茨城県　生活環境部　防災・危機管理局　消防安全課　係長

藤間功司　　防衛大学校　システム工学群　建設環境工学科　教授

【関係者】
福原和邦　　経済産業省 商務流通保安グループ 高圧ガス保安室　室長補佐

橋本千晃　　〃　　高圧ガス保安二係長

【事務局】
高圧ガス保安協会　総合企画部・高圧ガス部・総合研究所

目　次

１．目的と内容 ・・・

１．目的と内容

1.1　事業目的

平成２３年３月１１日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東日本大震災という。）においては、一部の高圧ガス設備で火災・爆発等が発生し、社会的に大きく扱われた事故が発生したほか、津波浸水区域で、様々な高圧ガス設備や容器の損壊、流出等が発生した。このため、昨年７月より総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会高圧ガス部会を５回開催し、東日本大震災による高圧ガス施設等の地震・津波による被害の調査・分析に基づき、今後の高圧ガス分野における地震・津波対策について検討を行い、「東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について」（以下、報告書という。）を取りまとめ、平成２４年４月２７日に公表したところである。今後、この方向性に基づき、具体的な方策、基準等の検討や、事業者による取り組みの促進といった対策の具体化を推進していく必要がある。

以上のようなことに鑑み、高圧ガス設備における地震及び津波に対する保安の向上を図るため、津波の波力、設備の浮力、漂流物の影響等の評価手法の検討を行い、技術基準案等の策定に向けた提言を取りまとめる。

1.2　検討内容

津波の波力、設備の浮力、漂流物の影響等の評価手法の検討において、以下の内容について検討した。

①構造物、建築部等に関する津波の影響の評価方法

②優先的に評価手法を策定すべき設備の検討

③優先的に評価手法の開発を行うべき施設の選定

1.3　委員会の運営

本調査研究の実施にあたっては、高圧ガス施設の津波対策検討調査委員会を設置し、審議を行い、結果を取りまとめた。

２．調査方法

①構造物、建築部等に関する津波の影響の評価方法

構造物、建築物等に関する津波の影響の評価方法について調査方法を検討し委員会において助言を得た後、文献収集や有識者等のヒアリングを行い、当該評価手法および適用可能な構造物の条件等について調査を行う。

②優先的に評価手法を策定すべき設備の検討

高圧ガス設備（塔類、槽類、配管等）のうち、津波による破損や流出により周辺地域に影響を起こす可能性の高い施設について優先順位付けを行うにあたり、実施方法について仕様を検討後、委員会において助言を得て実施する。

③優先的に評価手法の開発を行うべき施設の選定

①および②の結果を踏まえ、優先的に評価方法の開発を行うべき施設を選定する。

３．委員会開催

高圧ガス施設の津波対策検討調査委員会

平成２４年１０月　５　日・・・・平成２４年度調査研究計画について

平成２４年１２月　５　日・・・・平成２４年度進捗状況について

平成２５年　２　月　８　日・・・・平成２４年度調査研究成果について

４．調査結果

４．１　文献収集調査

高圧ガス施設の津波の波力､設備の浮力､漂流物の影響等の評価手法の検討を行うため、既存の構造物、建築物等に関する津波の影響の評価手法に関する文献等を収集し調査を進めた。文献等収集にあたっては、以下に示す観点から行った。

① 津波被害対策の方向を示す官公庁の報告書
② 津波被害に関する報告書
③ 他の分野での津波影響評価に関わる文献
④ 高圧ガス施設の津波影響評価の全体構想を考えるに参考となる文献
⑤ 高圧ガス施設の津波影響評価の各要素を考えるに参考となる文献

４．１．１　収集文献リスト

４．１．１．１津波被害対策の方向を示す官公庁の報告書

表 4.1.1

番号	タイトル	作成者	発行年月
1-001	防災基本計画	中央防災会議	平成 23 年 12 月
1-002	東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について	総合資源エネルギー調査会	平成 24 年４月
1-003	東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書	総合資源エネルギー調査会	平成 24 年３月
1-004	危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書	総務省消防庁	平成 21 年３月
1-005	津波防災地域づくりに関する法律	日本政府	
1-006	津波推計・減災検討委員会報告書	土木学会	平成 24 年６月
1-007	高圧ガス保安法　第３章保安	日本政府	
1-008	東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書	消防庁危険物保安室・特殊災害室	平成 23 年 12 月

４．１．１．２津波被害の報告

表 4.1.2

番号	タイトル	作成者など	発行年月
2-001	平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報) 6.津波による建築物の被害	建築研究所	平成 23 年
2-002	東北日本大震災による津波浸水域における学術調査報告書	東北大学・ユネスコ・政府間海洋学委員会	
2-003	2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報	港湾空港技術研究所資料 No.1231	平成 23 年 4 月
2-004	東日本大震災による県内高圧ガス施設被害について	宮城県総務部消防課	平成 23 年 9 月 28 日
2-005	高圧ガス事故概要報告・整理番号 2011-078・LPG 球形貯層の倒壊による火災及び爆発	高圧ガス保安協会	
2-006	高圧ガス事故概要報告・新潟地震による LP ガス球形貯層と LP ガス横置円筒形貯層の被災	高圧ガス保安協会	
2-007	国内外の主な事故事例	国立医薬品食品衛生研究所健康危機管理関連情報ホームページ	
2-008	海外産業施設地震被害調査報告-球形タンクおよび円筒タンク-	生産研究 26 巻 7 号	昭和 49 年 7 月
2-009	スマトラ地震の津波災害による屋外タンク貯蔵所等の被災事例調査報告	Safety & Tomorrow, No.104	平成 17 年 11 月
2-010	Pressure vessel Life Study/Condition Assessment Brief Description	Coastal Inspection Services, Inc.	

2-011	水工学委員会東日本大震災調査団報告書,道路橋等の被害要因の水工学の成果を用いた考察	土木学会水工学委員会	
2-012	東日本大震災による津波浸水域における建築物の被害	独立法人建築研究所 BRI-H23 講習会テキスト	

４．１．１．３　他の分野での津波影響評価

表 4.1.3

番号	タイトル	作成者など	発行年月
3-001	Guideline for design of Structures for vertical Evacuation from Tsunamis	FEMA	June2008
3-002	Evaluation of prototypical reinforced concrete building performance when subjected to tsunami loading	Y.Mikhaylov, I.N.Robertson UHM/CEE/09-01	June 2009
3-003	陸上構造物の耐津波性能評価手法の確立	柳澤宗	
3-004	津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究	新道路技術会議	平成22年6月
3-005	下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書	下水道地震･津波対策技術検討委員会	平成24年3月
3-006	原子力発電所の津波評価技術	土木学会原子力土木委員会津波評価部会	平成14年4月
3-007	大規模石油タンクで講じられている地震・津波対策と今後の課題	総務省消防庁危険物保安室長・鈴木康幸	
3-008	津波による道路施設の被災度と経済的損失の評価手法に関する現況等の調査と基礎的検討	国総研資料第 316 号	平成18年3月
3-009	平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書	東京大学生産技術研究所	平成23年7月

3-010	平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その２	東京大学生産技術研究所	平成23年10月
3-011	下水道 BCP 検定マニュアル第２版(地震・津波編)	国土交通省水管理局･国土保全局下水道部	平成24年3月
3-012	公共土木施設の地震・津波被害想定マニュアル(案)	国総研資料第 485 号	平成20年7月
3-013	自然災害による公共土木施設等の実用的な被災リスク評価手法の開発に向けた取り組み～洪水と地震・津波～	国総研･危機管理技術研究センター長･寺田秀樹	

国総研：国土交通省国土技術政策総合研究所

４．１．１．４　高圧ガス施設の津波影響評価の全体構想を考えるに参考となる文献

表 4.1.4

番号	タイトル	作成者など	発行年月
4-001	津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案	藤井直樹・今村文彦 自然災害科学 J.JSNDS28-4371-386	平成 22 年
4-002	高圧ガス設備耐震対策推進委員会報告書	高圧ガス保安協会	平成 19 年 3 月
4-003	石油精製業保安対策事業(海外における技術基準に関する調査(高圧ガス設備に関する欧米の設計基準及び維持基準の調査))報告書	高圧ガス保安協会	平成 24 年 2 月

４．１．１．５　高圧ガス施設の津波影響評価の各要素を考えるに参考となる文献

表 4.1.5

番号	タイトル	作成者など	発行年月
5-001	津波浸水想定の設定の手引き Ver.1.20	国土交通省	平成 24 年 4 月

5-002	平成 23 年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波シミュレーションの手引き	国土交通省	平成 23 年 7 月
5-003	SEISMIT-ST 取扱説明書(本編) まえがき	高圧ガス保安協会	昭和 62 年度版
5-004	SEISMIT-ST 取扱説明書(例題編) 2-6	高圧ガス保安協会	昭和 62 年度版
5-005	津波遡上時の燃料タンクの健全性評価	中部電力･技術開発ニュース No.130	平成 20 年 4 月
5-006	流木衝突力の実用的な評価式と変化特性	松富，土木学会論文集,No.621/II-47,111-127	平成 11 年 5 月
5-007	Inundation flow velocity of tsunami on land and its practical use	Coastal Engineering 2010 H. Matsutomi, K. Okamoto and K. harada	
5-009	没水球体に作用する波力の特性に関する実験的研究－Morison式の適用限界について－	第 34 回海岸工学講演会論文集(1987),岩田・水谷・川角	
5-010	Inundation flow velocity of tsunami on land	Island Arc (2010) 19, 443-457 H. Matsutomi, K. Okamoto	2010
5-011	津波による漂流物の港湾構造物影響調査	国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所・技術開発課	
5-012	容器構造設計基準・同解説	日本建築学会	昭和 43 年
5-013	実務的手法による津波波力の評価－直立構造物に作用する波力の数値計算－	土木学会論文集 A1 Vol.65, NO.1, 2009 鴫原・小竹・岩瀬・藤間	平成 21 年
5-014	Tohoku Earthquake & Tsunami Event Recap Report	AON BENFIELD	2011/8

5-015	津波の河川遡上解析の手引き(案)	(財)国土技術研究センター	平成 19 年 5 月
5-016	橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算	第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集 鴫原・藤間・庄司	平成 21 年
5-017	内水ハザードマップ作成の手引き(案)	国土交通省都市･地域整備局下水道部	平成 21 年 3 月
5-018	津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について	建設マネジメント技術 2012 年 2 月、国土交通省住宅局建築指導課	平成 24 年 2 月
5-019	遡上津波の漂流物による被害推定について	国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所･技術開発課第二係・佐藤友紀	
5-020	津波防災地域づくりに係る技術検討報告書	津波防災地域づくりに係る技術検討会	平成 24 年 1 月
5-021	1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考－津波被害関数の構築に向けて－	日本地震工学会論文集第 10 巻,第 3 号,2010 越村・萱場	平成 22 年

４．１．１．６　その他の参考となる文献

表 4.1.6

番号	タイトル	作成者など	発行年月
6-001	津波防災マニュアル-1 章 津波の基礎知識	石垣島地方防災連絡会	
6-002	現場担当者のための環境リスク対応ハンドブック 1 ～2 章	富山県高圧ガス安全協会	
6-004	中央防災会議・東南海、南海地震等に関する専門調査会（第 16 回）参考資料 2 「5 表層地盤の液状化計算方法」	内閣府	
B1	高圧ガス設備等耐震設計指針レベル 1 耐震性能評価 耐震設計設備・基礎編 2012 年版	高圧ガス保安協会	
B2	高圧ガス設備等耐震設計指針レベル 1 耐震性能評価 配管系編 2012 年版	高圧ガス保安協会	

B3	高圧ガス設備等耐震設計指針レベル 2 耐震性能評価 解説編 2012 年版	高圧ガス保安協会	
B4	高圧ガス設備等耐震設計指針レベル 2 耐震性能評価 評価例編 2012 年版	高圧ガス保安協会	
B5	高圧ガス設備等耐震設計指針(2012) 別冊 耐震設計関係省令・告示・通達等	高圧ガス保安協会	

(B1～B5 に関しては収集文献の要約無し)

４．１．１．７　追加して収集した文献

表 4.1.7

番号	タイトル	作成者など	発行年月
7-001	Design and Construction Guidance for Breakaway Walls	FEMA	2008
7-002	Protecting Building Utilities From Flood damage	FEMA	1999
7-003	Coastal Construction Manual	FEMA	2011
7-004	球形貯槽基準 JLPA201:2004	社団法人日本エルピーガスプラント協会技術委員会審議	平成 16 年
7-005	絆　JLPA 東日本大震災における LP ガス関連設備の被災及び対応状況	一般社団法人日本エルピーガスプラント協会	平成 24 年
7-006	Handbook of Structural Stability	Column Research Committee of Japan	1971
7-007	NKSJ-RM レポート 58 東日本大震災レポート 第 12 報(石油コンビナートの地震火災について)	NKSJ リスクマネージメント株式会社	2011 年 6 月 15 日

7-008	津波対策の推進に関する法律案 備考：可決	衆議院提出法案	平成 23 年 6 月 24 日公布
7-009	津波非難ビル等に係るガイドライン	津波非難ビル等に係るガイドライン検討会(内閣府)	平成 17 年 6 月
7-010	地上二重殻式低温タンク保冷工法について	ニチアス技術時報 N.331,2002,3 号	
7-011	A PHYSICAL INTRODUCTION TO FLUID MECANICS 10.6 DRAG OF BLUFF AND STREAMLINED BODIES & TABLE C.3 in APPENDIX C	ALEXANDER J. SMITS	
7-012	河川砂防技術基準調査編 第５章　河川における洪水流の水理解析	国土交通省	平成 24 年 6 月
7-013	水理公式集[平成 11 年度版] PP.212-218	土木学会	
7-017	改訂三版標準水理学	本間仁	
7-018	橋梁に作用する津波流体力と流況に関する SPH 法解析	村上・BUI・中尾・伊津野	
7-019	津波衝突時に橋桁に作用する波力	片岡・日下部・長屋	
7-020	パワーポイント:Tsunami Load Determination for On-Shore Structures	Harry Yeh, Oregon State University	
7-021	Lesson 2.6-Impluse Impulsive force and safety feature		

7-022	JLPA202:2005 横置円筒形貯層基準	日本エルピーガスプラント協会	
7-023	物部水理学 [13.5]段波	本間・安芸編 岩波書店	
7-024	Flood Resistant Design and Construction	ASCE/SEI 24-05	
7-025	Seismic Rehabilitation of Existing Buildings	ASCE/SEI 41-06	
7-026	Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures	SEI/ASCE 7-02	
7-027	Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures	ASCE/SEI 7-05	

４．１．２　収集文献の要約

4.1.2.1　津波被害対策の方向を示す官公庁の報告書

[1-001] 防災基本計画,中央防災会議, 平成 23 年 12 月

本文書は、下記の性格を持つものであることが、報告書内閣府の防災情報のページに説明されており、すべての災害に対して記述されている。

防災基本計画は、災害対策基本法第 34 条に基づき中央防災会議が作成する防災分野の最上位計画として、 防災体制の確立、防災事業の促進、災害復興の迅速適切化、防災に関する科学技術及び研究の振興、防災業務計画及び地域防災計画において重点をおくべき事項 について、基本的な方針を示している。及び、この計画に基づき、指定行政機関及び指定公共機関は防災業務計画を、地方公共団体は地域防災計画を作成している。

[1-002]東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について,経済産業省,2012 年 4 月

「報告書のポイント」には、今後以下の対応を行なうとしている。

① 津波までの間に高圧ガス設備を安全に維持できる状態にするための機能を持たせることを技術基準で義務付け。配管が破損した際に高圧ガスの漏洩を最小限にするための地震防災遮断弁の遠隔操作、動力が破損した際に高圧ガスの漏洩を最小限にするための地震防災遮断弁の遠隔操作、動力が喪失した場合に安全性が向上するように機能する作動、操作等の技術基準を設定。事業者は、従業員を安全な避難と設備の安全な停止等を両立できる判断基準、権限、手順等を危害予防規定に基づき規定する。

② 事業者は、被害を想定し被害低策を実施するほか、被害想定を自治体に提供することを、危害防止規定に基づき規定する。

③ 事業者は、容器・ローリーについて、津波による流出を最低限にするための措置を講ずるための判断基準、権限、手順等を危害予防規定に基づき規定する。

④ 容器流出にむけ、関係団体ごとにガイドラインを策定・普及。審議会によるフォローアップ。

⑤ 流出容器は所有者が回収の責任者を有する。事業者は、流出容器回収の対応方針を危機予防規定に基づき規定する。

⑥ 事業者は、人名を保護するための対策を実施。

⑦ 設備が波力、浮力及び漂流物により受ける影響を評価するための手法を新たに検討。

「報告書」には、以下の対応を行なうとしている。

*[高圧ガス施設等の津波対策については、以下のふたつのレベルの津波を想定する。①生頻度は極めて低いものの、発生すれば寛大な被害をもたらす最大クラスの津波、②最大クラスの津波に比べて発生頻度が高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波。ここで、①に対しては、「最大クラスの津波に対しては、(中略)、高圧ガス施設が津波で被害が受けたとしても、周辺の住民の生命が保護されることが必要である。(中略)。加えて、最大クラスの津波による事業所内の高圧ガス設備等の破損や流出を完全に防止することは、技術的にも経済的にも困難であると考えられる。そのため事業所は、事業所内の高圧ガス設備が津波により破損、流出し、ガスが漏洩した場合等の被害を想定し、周辺自治体等に

情報を提供することが必要である。このため、設備に対して津波の波力、設備の浮力、漂流物が及ぼす影響を評価する手法を検討する必要がある。このため、設備に対して津波の波力、設備の浮力、漂流物が及ぼす影響を評価する手法を検討する必要がある。」、と述べている。また、「高圧ガス設備の形状、種類は多種多様であり、すべての設備を一定の手法で評価することは困難である（以下省略)」、と述べている。

[1-003]東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書.経済産業省.2012 年 3 月「報告書の要点」(P.49)には、以下のことが述べられている。

本震災により、８県において約４８万戸の都市ガス供給が停止した。全国から５８事業者、延べ１０万人、最大支援時一日 4,100 人を投入し、被害甚大地域を除き、２ヶ月弱で供給を再開した。津波対策は、想定される津波レベルに応じた下表の要求をみたす対策を各事業者が実施すべきとしている。

表 4.1.2.1

		津波Ａ(一般的な津波)	津波Ｂ(最大クラスの津波)
設備区分Ⅰ	被害が発生した場合の影響の大きな施設。 (例)貯層、高圧ガス導管等	・ 人身事故等の二次災害を防止する。 ・ 重大な機能被害を防止する	・ 人身事故等の二次災害を防止する。 ・ 機能被害の発生に対して、系統多重化、拠点の分散、代替手段の確保に努める。
設備区分 II	その他の施設。 (例)ガス発生設備、低圧ガス導管等	・ 人身事故等の二次災害を防止する。 ・ 機能被害を可能なかぎり防止する。	

および、具体策として以下のことを述べている。

表 4.1.2.2

	津波に対する具体策項目
設備対策	保安電力等重要な電気設備の想定津波高さに応じた津波･浸水対策を実施する。
緊急対策	・ 漂流物の衝突により導管が損傷することによる二次災害の防止のため、衝突の恐れのある導管を特定し、関係する遮断装置をリスト化しておく。 ・ 現場作業員の安全確保を図るため、避難場所の確保、マニュアル類の見直し、避難訓練等を実施する。
復旧対策	（省略）
その他	（省略）

及び、「報告書」には、以下のことが述べられている。
[津波による被害]
一般ガス事業者に関しては、杭基礎のある配管・架構類には被害がなかったが、杭基礎以外の基礎の配管・架構類の一部が損傷した。また、２事業所において、中圧の気化器に漂流物の衝突が原因とみられる損傷があった。および甚大な被害を被った仙台市ガス局港工場(浸水高さ 3～4m)で、各所建屋周囲が洗掘された。簡易ガス供給に関しては、７地点群でシリンダー倉庫が被害を被り、そのうち２地点群で、シリンダー容器が流出した。

[液状化による被害]
一般ガス事業者に関しては報告なし。簡易ガス供給に関しては、一地点の簡易ガス団地が被害を受け、内部設備に被害がなかったものの、特定製造所の建物の床や壁にひび割れが生じた。

一般ガス事業における災害対策指針(地震・設備対策)として、以下のものが紹介されている。
製造設備等耐震設計指針(H24.3)
LNG 小規模基地設備指針(H23.10)
LNG 地下式貯槽指針(H24.3)
LNG 地上式貯槽指針(H24.3)
LPG 貯槽指針(H17.10)
LNG 受入基地設備指針(H16.3)
製造所保安設備設置指針(H14.3)
製造設備等耐震設計指針(H24.3)

[1-004]危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書,総務省消防庁,平成 21 年 3 月

津波による危険物屋外貯蔵タンクの被害事例、対策事例、予測手法の提案、実施した被害予想の結果、津波被害対策の検討結果が述べられる。この本報告書での危険物施設は平底円筒形の石油タンクを対象としている。

２．３節に津波・浸水対策事例調査結果が報告されている。これは、(ａ)一般的な津波・浸水対策、と(ｂ)屋外タンク貯蔵所を対象とした津波対策事例、にわけて記述しており、（ｂ）に関しては１事例のみ紹介されている（静岡県焼津漁港の一角にある屋外貯蔵タンク郡の周囲に設置された津波防護壁)。(ａ)に関しては、防波堤、防潮堤、水門、漂流物対策施設(津波スクリーン)が紹介されている。また研究されている対策工として、フラップ式構造物、直立浮上式防波堤、津波・高潮防災ステーションを紹介している。

３．１（１）節に、被害事例調査で、津波被害による屋外タンク貯蔵所の被害として多

く見られたのは、タンクの浮き上がり、タンクの滑動、タンクの座屈による油の流出と報告している。および、津波漂流物のタンクへの衝突、防油堤の損傷が見られたと報告している。そして、考えられる被害形態として、浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧による側板座屈、タンク傾斜による底板抜け出し、タンク傾斜による側板下部座屈、押し上げ時の基礎の洗掘や引き潮時の基礎の崩壊、が考えられると述べている。

３．２（２）節に、浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧による側板座屈、の４つの被害形態の予測手法を提案している。タンク傾斜による底板抜け出し及びタンク傾斜による側板下部座屈、に関してはタンクの有限要素法解析により予測手法を作成しようとしたが、できなかったと述べている。また、押し上げ時の基礎の洗掘や引き潮時の基礎の崩壊は、津波諸量（浸水深、流速）のみから予測することができないとし、検討対象からはずしている。

[1-005]津波防災地域づくりに関する法律

本法律により、都道府県知事は、津波があった場合に想定される水深の区域および水深を設定しなければならないことが定められている。また、この想定される水深の区域および水深を津波水深想定とよぶことが定められている。

および、都道府県知事は、津波浸水想定を踏まえ、津波が発生した場合に住民等の生命に危害が生ずる恐れがある区域のうち、警戒避難体制を整備する区域を、津波災害警戒区域として指定できることが定められている。

および、都道府県知事は、津波浸水想定を踏まえ、津波災害警戒区域のうち、住民等の生命に著しい危害が生ずる恐れがある区域で、開発行為、建築、建築物の用途を制限すべき区域を、津波災害特別警戒区域として指定できることが定められている。

[1-006]津波推計・減災検討委員会報告書,土木学会,平成 24 年 6 月

本報告書は、耐災という概念(減災と防災を含めたより広い意味)を創出できたことを成果としている。および、報告書の中で、火力発電所、原子力発電所、高速道路、鉄道における津波対策のあり方について、意見を述べている。

[1-007]高圧ガス保安法 第３章 保安

「第１種製造業者は、危害予防規程を定め、これを都道府県知事に届け出なければならない」ことが記述されている。

[1-008]東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書，消防庁危険物保安室・特殊災害室，平成 23 年 12 月

（１）本文献には文献には、詳細な目次がついていないので、これを３．８に記した。

（２）本調査の調査対象 16 県（北海道、青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、

福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、新潟県、山梨県）には、約２０万の危険物施設があり、そのうち約３千施設が被災し、その半分は津波によるものであった。調査対象 16 県のうち、津波被害のあった県は、宮城県（1048 施設）、岩手県（429 施設）、福島県（153 施設）、青森県（127 施設）、茨城県（40 施設）、千葉県（14 施設）、北海道県（10 施設）の７県で、その合計施設数は 1821 施設である。また、太平洋沿岸に隣接する市町村を「沿岸部の地域」、それ以外の地域を「沿岸部以外の地域」として集計すると、沿岸部の地域における津波による被災件数は 1820 施設であり、津波による被災施設は、１施設を除き、すべて沿岸部の地域にあった。なお、沿岸部の市町村名は、財団法人地方自治情報センターの全国自治体マップ検索
https://www.lasdec.or.jp/cms/1,0,69.html より把握できる。

施設形態別の被災件数を次表に示す。津波による被災件数は屋外タンク貯蔵所がもっとも多い。また、原因が流出である被災の中で、もっとも多い施設形態も屋外タンクである。

表 4.1.2.2

	施設形態の別	津波による被災施設数	原　因				調査対象域内の施設数
			火災	流出	破損	その他	
1	製造所	4	0	0	3	1	2,058
2	屋内貯蔵所	136	0	1	127	8	20,761
3	屋外タンク貯蔵所	398	1	92	219	86	26,572
4	屋内タンク貯蔵所	19	0	2	17	0	5,161
5	地下タンク貯蔵所	167	0	2	124	41	52,015
6	簡易タンク貯蔵所	4	0	0	2	2	378
7	移動タンク貯蔵所	358	28	0	230	100	36,037
8	屋外貯蔵所	57	0	2	52	3	4,704
9	給油取扱所	307	0	1	281	25	29,187
10	販売取扱所	4	0	0	3	1	860
11	移送取扱所	23	0	2	14	7	587
12	一般取扱所	344	7	4	275	58	33,557
合計		1821	36	106	1347	332	211,877

（３）屋外タンクの津波による火災被害を以下のように報告している。

津波により発生した１件の火災は、許容容量が 980kl のガソリンを貯蔵するタンクで津波により地盤が洗掘され基礎が破損したものと推定されている。

（４）屋外タンクの津波による流出被害を以下のように報告している。

津波により発生した 92 件の流出は、下表に示す部位から起こった。

表 4.1.2.3

側板	底板	タンク等移動	配管	不明	合計
15	1	59	61	2	92

（５）屋外タンクの津波による移動被害を以下のように報告している。

津波によるタンクや配管の移動があった 80 件のうち、タンク本体の移動が 79 件、配管の移動は 38 件（複数回答）であった。

この 80 件を許可容量別に整理したものを下表に示す。容量が小さいものが多くの被害を受けたと言える。津波によってタンク本体が起こる条件を明らかにすることは今後の課題である。

表 4.1.2.4

500Kl 未満	500Kl 以上 1,000Kl 未満	1,000Kl 以上 10,000Kl 未満	10,000Kl 以上	合計
62	11	7	0	80

（６）屋外タンクの津波による破損被害を以下のように報告している。

津波によるタンクや配管に破損があったものを、被害部位別にまとめたものを下表にしめす（一施設で複数の部位が破損した重複を含む)。最も多かったものは、付属配管、その後ろに防油堤、基礎地盤が続く。

表 4.1.2.5

側板	底板	防油堤	基礎地盤	浮屋根浮き蓋	付属配管	その他
15	7	50	49	7	97	62

（７）屋外タンクの津波による危険物の流出防止対策について以下のように述べている。

津波による危険物の流出については、配管が津波により破損することにより、タンク内の危険物が流出した事例が確認されている。配管は流出・移動や破損において被害の多数を占めることから、津波による危険物の流出を最小現に抑えるためには、配管の破損に伴うタンクからの大量流出を防止する対策を検討する必要があると考えられる。

現在、容量が 10,000kl 以上の屋外タンクの危険物を取り扱う配管については、タンクに結合される直近に緊急遮断弁を設けることが義務付けられている。今回の被害調査にあたって、受入・払出配管の破損があった施設について緊急遮断弁のアンケートを実施したところ、94 件の回答があった。このうち、危険物の流出があったと回答した 59 件について緊急遮断弁の有無について整理したところ、遮断弁のあるのが 6 件、遮断弁のないものが 53 件で、遮断弁を有していたものはすべて 10,000kl 以上のタンクであった。緊急遮断弁を有していたにもかかわらず配管から危険物が流出した施設あった。その原因は、地震により常用電源と非常電源の両方を喪失したためとされている。

（８）屋外タンクの津波による被害防止の課題を、以下のように述べている。

万一津波に襲われた場合にタンクが移動するかどうかをあらかじめ想定しておくことは、タンクの移動による二次災害を最小限に抑える上で重要と考えられる。津波によるタンク本体の移動は、タンク本体の重量、貯蔵危険物の重量、アンカーの有無、津波の浸水深などが複合的に作用することから、タンクの規模ごとに、津波の浸水深と危険物の貯蔵量の

関係からタンク本体の移動の有無を整理する必要がある。
配管を通じた危険物の大量流出を防止する対策としては、緊急遮断弁の設置が有効と考えられることから、緊急遮断弁の設置が必要なタンクの規模について検討する必要がある。また、今回の震災において、緊急遮断弁が電源喪失により有効に作動しなかった事例も見られることから、地震時において有効に作動する緊急遮断弁のあり方についても検討する必要がある。

（９）屋外タンクの浸水深と被害の関係を以下のように報告している。
津波を受けた屋外タンクについて、①タンク本体・付属配管とも被害がなかったもの、②タンク本体に被害がなかったが付属配管に被害があったもの、②タンク本体・付属配管とも被害があったもの、という分類で整理したところ、配管及びタンクの被害は浸水深が概ね３ｍをこえたところから発生し、７ｍを越えるとタンクの被害の発生が顕著になる。

（１０）屋外タンクの被害シミュレーションについて以下のように報告している。
津波を受けた屋外タンクの中で、タンクが移動した事例としなかった事例それぞれに対して、提案されている波力算定式によりタンクが移動するか・しないかシミュレーションしたところ、おおよそ一致する答えを得た。したがって、提案されている津波波力によって被害を予測することは有効である。
なお、津波波力の計算方法は、参考資料７「屋外貯蔵タンクに作用する津波波力の算定方法」に記述されている。

（１１）屋外タンクの液状化被害について以下のように報告している。
屋外タンクの液状化による被害は、同一事業所の２基について発生している。それらのタンクの特徴は、①タンク設置場所が過去において河川流路付近であった、②液状化可能指数 PL は基準を満たしていたが、PL を算出する元の N 値にばらつきがみられた、である。液状化による屋外タンクの主な被害はこれらの事例に限られることから、現状の液状化に関する技術基準は妥当であると考えられる一方、上記の特徴について注意喚起する必要がある。

（１２）危険施設の津波対策のあり方を、次のように提言している。
「既往の津波波力算定式を利用した津波被害シミュレーションの有効性が確認されたことから、事業者が、東日本大震災の教訓を踏まえた見直しが行なわれる津波予測に基づき被害シミュレーションを実施し、想定される地震・津波に応じた被害想定を作成するとともに、これらの情報を予防規程に反映するよう事業者に求める必要がある。」

4.1.2.2　津波被害の報告

[2-001]平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報) 6.津波による建築物の被害

東北地方太平洋沖地震津波による建物被害の現地調査結果と、津波が建物に及ぼす力の文献調査結果を報告している。

津波が建物に及ぼす力に関して調査された文献は、①津波避難ビル等に係るガイドライン(内閣府)、②Guideline for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis(FEMA P646)、③Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE 7-05,2006 年)、の三つである。①は設計浸水深の 3 倍に対する静水圧で全体の津波力を経験的に評価するものである。②は静水圧と流体力を理論的に別々に評価するものである。③は「静水圧と流体力を理論的に別々に評価すること」という主旨のことを文章で述べ、その具体的な式は明記していない。ただし、流速が 3.05m/s(約 11km/時)以下の場合、次式で等価割り増し深さを求め、これを設計浸水深に加えて、静水圧で全体の津波力を評価してよいと述べている。この考え方は、全体の津波力を静水圧計算のみで代表させるので、①に近い。

(等価割り増し深さ計算式)

$$d_h = \frac{aV^2}{2g}$$

ここで、d_h：等価割り増し深さ，a：抗力係数，V：流体速度，g：重力加速度

[2-002]東北日本大震災による津波浸水域における学術調査報告書

東北大震災による津波の浸水高は仙台湾沿岸で最大約 10ｍであったことを記述している。

[2-003] 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報,港湾空港技術研究所資料 No.1231,2011 年 4 月

東日本大震災による津波は 10m クラスの津波(沿岸域での津波高さ､この位置では津波高さ＝浸水深)で、10～30km/時の速さで内陸に入っていったと報告している。及び、以下のように津波による港の被害状況を報告している。

表 4.1.2.6

県	港及び地域	港湾施設などの被害
青森県	八戸港	10t 程度の船舶が岸壁に打ち上げられた。総延長約 3500m 防波堤ケーソンのうち約 1900m が被害を受けた。防波堤開口部で 10m 程度の洗掘が

		起こった。埋立地の角部で 13m の洗掘がおこり、埋立地を形成するスリットケーソンが転倒した。
岩手県	久慈港	防波堤が消失した。仮置きケーソンが破壊された。
	宮古港	マリーナの防波堤や護岸が被害を受けた。護岸の一部が消失した。
	釜石港	洗掘により防潮壁の一部が倒壊した。構内の建物が破壊された。木造、鉄骨建物は大きく破壊されたものが多い。鉄筋コンクリートの建物は、浸水しても倒壊しているものは無かった。
	大船渡港	浸食により防潮壁の一部が倒壊した。
宮城県	気仙沼港	重油タンクが漂流した。港に置かれていた多くの船が漂流した。
	女川港	防波堤が消失した。
	石巻港	防波堤の大きな損傷は見られなかった。
	仙台塩釜(塩釜港区)	建物に大きな被害は見られなかった。船舶・トラック・車が多数漂流していた。
	仙台塩釜(仙台港区)	目視では、防波堤の大きな損傷は見られなかった。 タンクローリーやトラックなどの車が多数漂流、建物等に損傷を与えていると思われる。
福島県	相馬港	総延長 2730m のケーソンのほとんどが滑動し、傾斜またはマウンドから転落して水没した。防波堤前面の消波ブロックも移動し、ほとんどが水面下に没した。
	小名浜港	漁船や作業台船が陸上に打ちあがった。防波堤に被害はみられなかった。埠頭先端の両角部において 5m 程度の局所的洗掘が生じた。
茨城県	茨城港(日立港区)	目視では、防波堤の大きな損傷は見られなかった。エプロン、陸揚げ場の舗装にひびわれや段差がおこった。埠頭の先端の岸壁が倒壊した。
	茨城港(常陸那珂港区)	シャッターが壊された。
	茨城港(大洗港区)	目視では、防波堤の大きな損傷は見られなかった。
	鹿島港	フェンスがなぎ倒された。

[2-004]東日本大震災による県内高圧ガス施設被害について,宮城県総務部,消防課,平成23年9月28日

東北大震災による津波の浸水地域にある７２の高圧ガス施設において、貯槽等の倒壊・転倒が３事業所，貯槽等の基礎部分の亀裂・破損が１事業所，貯槽等の基礎アンカーボルトの緩み・破損が５事業所、貯槽等の脚部溶接部の亀裂・破損が２事業所、貯槽の不同沈下が４事業所、事業所等の倒壊・破損が３０事業所、あったことを報告している。および、車、自動販売機、コンテナ、木材等の漂流物がぶつかったことにより、施設が損傷したことを報告している。

[2-005]高圧ガス事故概要報告・整理番号2011-078・LPG球形貯槽の倒壊による火災及び爆発

東北地方太平洋沖地震により千葉県市原市で発生したLPG球形貯槽の倒壊・火災・爆発事故を報告している。当該地区にあった17基の球形貯槽のうち、破裂4基、移動4基、倒壊4基、倒壊寸前1期、傾斜1期。最初の地震から約30分後のニ回目の地震でガスが漏洩、それから約30分後にLPGガスに着火・火災発生、それから15分後に最初の球形貯槽爆発、それから17時間後に鎮火した。負傷者6名、住民避難者約1000名。

[2-006]高圧ガス事故概要報告・新潟地震によるLPガス球形貯層とLPガス横置円筒形貯層の被災

新潟地震により新潟県新潟市にある原油タンク５基が火災を起こし、２週間燃え続け、290棟の民家が全焼させた。この火災で被災した計５基の高圧ガス貯槽を報告している。

[2-007]国内外の主な事故事例,国立医薬品食品衛生研究所健康危機管理関連情報ホームページ

LPGガスターミナルの爆発で約500人が死亡した事故、農薬製造工場タンクから有毒物質が流出・拡散し約2000人が死亡した事故、などを紹介している。

[2-008]海外産業施設地震被害調査報告-球形タンクおよび円筒タンク-,生産研究 26巻 7号,1974年7月

地震によるタンクの被害事例を報告している。記述されている被害が、どの部分が津波による被害かということは特定できないが、’Alasaka地震に際するWhitter地区Union Oil社による被害状況’という図が載っており、敷地内の多くのタンクが津波により移動している。そして、Earth Dikeがさらなるタンクの移動を食い止めたように見える。

[2-009]スマトラ地震の津波災害による屋外タンク貯蔵所等の被災事例調査報告,Safety & Tomorrow, NO.104,2005年11月

2004 年のスマトラ地震津波によるインドネシア・アチェ州でのタンク被害を記述している。本津波により、17 万人が死亡した。津波は 3km 程度内陸に遡上した。タンクにおいては、ロンガのセメント工場の石油設備で、タンクの浮上・移動(最大 300m)、つぶれ、があったことを述べている。

[2-010] Pressure vessel Life Study/Condition Assessment Brief Description, Coastal Inspection Services, Inc.

1944 年 East Ohio でおきた LNG ガス爆発事故の圧力容器(損傷)の写真が記載されている。

[2-011] 水工学委員会東日本大震災調査団報告書,道路橋等の被害要因の水工学の成果を用いた考察,土木学会水工学委員会

東日本大震災の津波で被害を受けた橋梁について次のように報告している。

本津波により被害を受けた橋梁の数は 10 数橋である。津波は陸上部では減衰するが、河川内では波高が減衰しない状態で遡上する。津波による落橋を防止するためには、津波の伝播解析を行ない、それより求められる波高および流速分布を用いて水平力・揚圧力を求め、それらに耐えることができる支承を設計することが重要である。

[2-012] 東日本大震災による津波浸水域における建築物の被害, 独立法人建築研究所 BRI-H23 講習会テキスト

東日本大震災の津波により、鉄筋コンクリート造建築物の周辺地盤が洗掘されて穴があき、そこに建物が倒れ込んで傾斜した写真が登載されている。

4.1.2.3　他の分野での津波影響評価

[3-001] Guideline for design of Structures for vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA, June 2008　(呼称：FEMA P646)

津波避難所の設計用に津波が建物に及ぼす、流体の静水力、浮力、流体力、衝撃力、瓦礫衝撃力、上床に作用する浮力、上床に作用する流体重力、が説明されている。また、本報告書の付属資料Ａに、日本の避難ビルが紹介されている。

[3-002] Y.Mikhaylov, I.N.Robertson, Evaluation of prototypical reinforced concrete building performance when subjected to tsunami loading, UHM/CEE/09-01,June 2009

FEMA P646 に記載されている津波荷重の計算方法をレビューしている。

[3-003] 柳澤宗:陸上構造物の耐津波性能評価手法の確立

津波による陸上構造物の被害は、①津波の波力の被害、②流れのよる被害、③漂流物による被害、の三つが主なものと述べている。その中で津波の波力を取り上げ、これが建物に及ぼす力を実験により調べている。なお、文書の中で、現行の津波避難ビルにおける設計用波力は、浸水深の３倍の高さの静水圧にとっていることを述べている。

[3-004] 津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究,新道路技術会議,平成22 年 6 月

橋桁が津波により移動させられてしまうかどうかの評価方法を以下のように説明している。

津波が橋桁に作用する力を $F=\frac{1}{2}\rho_w \cdot C_d \cdot v^2 \cdot A$　で求める。ここで、ρ_w：水の密度，C_d：抗力係数，v：水の速度，A：被圧面積(構造高×桁長)。桁の抵抗力を $S=\mu \cdot W$ で求める。ここで、μ：摩擦係数(0.6)，W：上部工重量。桁抵抗力津波作用力比 $\beta=\frac{S}{F}$ を計算し、これが 1 より大きければ移動せず、小さければ移動してしまう。

この手法を、2004 年スマトラ沖地震でおきたインドネシア・スマトラ半島バンダアチェ付近で起きた津波で調査した被害橋梁に適用し、β が小さいものほど大きな損傷を受けたと報告している(β が 0.8 程度で損傷ランク A)。

[3-005]下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書，下水道地震・津波対策技術検討委員会，平成 24 年 3 月

本報告書は、以下のことを報告している。

東日本大震災は、下水道施設(管路・処理場・ポンプ場)に大きな被害をもたらした。東北地方太平洋沿岸部に位置する多くの処理場・ポンプ場で、浸水により電気施設が、津波波圧や漂流物の衝突により構造物が、破損した。震災発生時 48 の施設が稼働を停止し、そのうち１４処理施設は、１年後においても稼働を再開できていない。下水処理施設の稼働停止すると未処理下水が放出され、水系伝染病の発生など公衆衛生上、重大な事態が起こる可能性がある。

下水道施設は液状化による被害も受けており、埋め戻し部の液状化と周辺地盤全面液状

化のふたつに分けて考察している。また、耐津波対策を講じるため想定する津波は都道府県知事が設定・公表する「津波浸水想定」を用いる。

[3-006] 原子力発電所の津波評価技術

本報告書は地震より想定される津波水深の推定方法を述べている。これは、はじめにMansinha and Smylieの方法により、地震から起こる海底面の鉛直変位をもとめ、これを海上面の初期水位として、津波伝播を表す基礎方程式を解くというものである。津波伝播を表す基礎方程式は、(1)線形長波理論、(2) 非線形長波理論、(3) 分散波理論から、適切なものをユーザが選択する、としている。

なお、津波推計・減災検討委員会報告書[5]は、本報告書に対し、次のコメントを述べている。「発電所を襲った津波高さ10mの防波堤を乗り越えていて、東京電力が想定し対策していた津波高さを越えるものであった。想定津波高さは、2002年に土木学会から刊行された「原子力評価技術」によっており、この報告書作成に電力関係者が多数加わっているという理由で、報告書の第三者性が疑わしいとの批判が報道やインターネット上に見られた。(序)」,および、「土木学会「原子力発電所の津波評価技術」の改訂動向：2002年に土木学会による津波評価技術がまとめられて以降、設計津波水位の設定のための標準的なマニュアルとして関係者に利用されてきた。しかし、基本条件として考慮すべき震源の設定において、東北地方太平洋沖地震の震源を想定しておらず適用可能な範囲に限界があることが明らかになった。今後は、このように再現期間の長い巨大津波を基準津波の設定に反映する必要がある。日本海溝沿いに関しては東北地方太平洋沖地震を既往最大津波として扱う場合の課題を追求するとともに、他の地域に関しては既往最大地震や想定地震に関する地震学の進展を適切に取り入れて改訂する必要がある。」

[3-007] 大規模石油タンクで講じられている地震・津波対策と今後の課題, 総務省消防庁危険物保安室長・鈴木康幸

次の内容が報告されている。

容量が 1000kl 以上の大規模な石油タンクは、事故があった場合、大きな被害に結びつくので、特定屋外タンク貯蔵所として、特別な注意をはらっている。特定屋外タンク貯蔵所は、地震・風圧に対して耐えることができる設計されているが、津波の波力に対する耐久性を考えた設計はされていない。

東日本大震災の教訓として、タンク下端から津波浸水深が 3m 以下の場合はタンク本体・付属配管とも津波被害が生ずる可能性は低いが、3m 以上となると付属配管が破壊するおそれがある。

津波浸水深が 5m 以上になるとタンク本体の滑動が起こる可能性がある。滑動可能性はタンクの大きさ、タンク内の液量によって変わることから、消防庁が提供する予定の津波被害シミュレーションを活用して被害想定を行なうことを考えている。

報告書「臨海部の地震被災影響検討委員会報告書」で記述されているシミュレーションは計算条件が適切でない。

[3-008] 津波による道路施設の被災度と経済的損失の評価手法に関する現況等の調査と基礎的検討, 国総研資料第 316 号, 平成 18 年 3 月

津波が橋梁に及ぼす力を詳しく述べている。

[3-009] 平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書, 東京大学生産技術研究所, 平成 23 年 7 月

現地調査より、津波浸水深と建物の被害程度の関係を調べた結果を報告している。

[3-010] 平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その 2, 東京大学生産技術研究所, 平成 23 年 10 月

津波が建物に及ぼす荷重のいろいろな評価式を調査している。

[3-011] 下水道 BCP 検定マニュアル第 2 版(地震・津波編), 国土交通省水管理局・国土保全局下水道部, 平成 24 年 3 月

津波が下水道設備に及ぼす影響とそれに対する対策を検討した結果を述べている。

[3-012] 公共土木施設の地震・津波被害想定マニュアル(案) ,国総研資料第 485 号, 平成 20 年 7 月

四つの公共土木施設(海岸施設、港湾施設、河川施設、道路施設)に対して、地震・津波の被害想定を行なう方法を記述している。

[3-013] 自然災害による公共土木施設等の実用的な被災リスク評価手法の開発に向けた取り組み～洪水と地震・津波～, 国総研・危機管理技術研究センター長・寺田秀樹

中小河川に対する治水安全度評価手法、津波により施設に生じる被害想定手法を報告している。

4.1.2.4　高圧ガス施設の津波影響評価の全体構想を考えるに参考となる文献

[4-001] 藤井直樹・今村文彦：津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案,自然災害科学 J.JSNDS28-4371-386（2010）

被災モードを、(a) 野外タンクの浮き上がり,(b) 野外タンクの滑動,(c) 野外タンクの転倒,(d) 野外タンクの座屈,(e) 野外タンクの傾斜,(f) 配管の破損,(g) 構造物周辺の洗掘,(h) 漂流物の衝突,(i) 坊液堤の破壊、ように提案している。

[4-002] 高圧ガス設備耐震対策推進委員会報告書,平成 19 年 3 月

津波によるタンクの被害の事例を紹介するとともに､｢津波に対する避難ビルのガイドライン」による円筒縦置タンクに対する構造計算の考え方と、これを LPG 低温タンクへ適用した計算例が示されている。事例ではタンクの浮き上がり移動、タンクの衝突とそれにより衝突されたタンクの移動、タンクのつぶれ、もれでて津波により広がったガソリンに着荷し民家 160 戸を延焼した事例、などを記述している。

計算例では、タンクが座屈する波高、タンクアンカーボルトが壊れる波高、を求めている。いずれも壊れるであろう津波高さをアウトプットとしている。

[4-003] 石油精製業保安対策事業(海外における技術基準に関する調査(高圧ガス設備に関する欧米の設計基準及び維持基準の調査))報告書,高圧ガス保安協会, 平成 24 年 2 月

ASME Section VIII および API 579-1/ASME FFS-1 の米国各州での取り入れ状況を調査している。ここで、

ASME　米国機械学会　American Society of Mechanical Engineers
API　　米国石油学会　　American Petroleum Institute
ASME Section VIII　ボイラーと圧力容器の規格
API 579-1/ASME FFS-1　　API・ASME 共同の供用適正評価規格

4.1.2.5　高圧ガス施設の津波影響評価の各要素を考えるに参考となる文献

[5-001]津波浸水想定の設定の手引き

津波浸水想定は、最大クラスの津波があった場合に想定される浸水の区域・水深を求めることであることが述べられている。そしてこれを、コンピュータ・シュミレーションを利用して定める方法が説明されている。

および、コンピュータ・シュミレーションが解く方程式は浅水方程式であることが述べられている。

[5-002]平成 23 年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波シミュレーションの手引き

津波のシミュレーションは浅水方程式を解いて求めることを基本とすることが明記されている。及び、岩手県・宮城県及び東北地方太平洋沖地震の断層モデルの緒言、地形データ（陸域、海域）の所在が述べられている。

[5-003]SEISMIT-ST 取扱説明書(本編)

本文書は､高圧ガス設備の塔槽類を支持する架構の耐震性を評価するプログラムの説明書

[5-004]SEISMIT-ST 取扱説明書(例題編)

本文書は、塔と横置円筒貯槽を同時に支える架構の解析例を説明している

[5-005]津波遡上時の燃料タンクの健全性評価,中部電力・技術開発ニュース No.130／2008-4

津波が縦型円筒タンクを襲ったときの波圧を実験で測定し、測定波圧分布を用いた有限要素法数値解析により、タンクの座屈強度を検討した結果を報告している。解析結果は、単純な円筒状の等圧分布を与えた場合の座屈とは異なり、波圧の大きい部分が局所的に変形したものとなっている。

[5-006]松富：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性,土木学会論文集,No.621/II-47,111-127,1999.5

本論文は、下記の流木衝突力(実験式)を提案している。

$$F_m = 1.6 \cdot C_{MA} \cdot \{V_{A0} / (g \cdot D)^{0.5}\}^{1.2} \cdot (\sigma_f / \gamma \cdot L)^{0.4} \cdot (\gamma \cdot D^2 \cdot L)$$

ここで、

C_{MA}：見かけの質量係数，V_{A0}：衝突速度，g：重力加速度，D：流木径

σ_f：木材の降伏応力，γ：流木の単位体積重量　　,L：流木径長

[5-007] Matsutomi, Okamoto, Harada, Inundation flow velocity of tsunami on land and its practical use

本論分は､津波速度を､津波が建物にぶつかったときの建物前面の水深と背面の水深から、次式(実験式)で求めることを提案している。

$u = c_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_f - h_r)}$ ここで、u：津波速度，c_v：速度係数，g：重力加速度

h_f：建物前面の水深，h_r：建物背面の水深

そして、$c_v = 0.6$を推奨している。

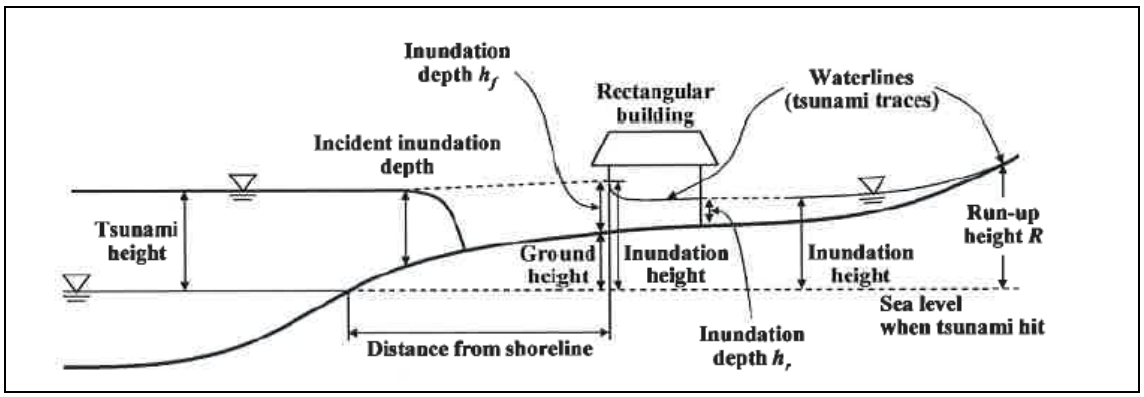


図 4.1.2.5.1

[5-009] 没水球体に作用する波力の特性に関する実験的研究－Morison 式の適用限界について－, 第 34 回海岸工学講演会論文集(1987),岩田・水谷・川角

水に没した球体に働く力をモリソン式で求める方法を紹介している。

[5-010] Inundation flow velocity of tsunami on land　Island Arc (2010) 19, 443-457 H. Matsutomi, K. Okamoto

津波に遭った建物の、津波正面での浸水深と背面での浸水深から流速を推定する式を提案している。それらは

最大流体力を推定する流速　$u = 0.66\sqrt{g \cdot h_f} = 1.2\sqrt{g \cdot h_r}$

最小流体力を推定する流速　$u = 0.36\sqrt{g \cdot h_f} = 1.42\sqrt{g \cdot h_r}$

である。ここで

g：重力加速度, h_f：建物の津波正面における浸水深, h_r：建物の津波背面における浸水深

なお、ベルヌーイの定理から導かれる流速は $u = \sqrt{2g(h_f - h_r)}$ である。

[5-011] 津波による漂流物の港湾構造物影響調査, 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所・技術開発課

本報告書は、近年大型港湾に大量のコンテナが存在し、これらが津波により漂流し、構

造物に衝突して構造物に破壊的な被害を及ぼすことも考えられる、としている。そしてこれを定量的に評価するため行った実験の結果を報告している。

そして、コンテナの構造物への衝突力を推定する式として、次のものを紹介している。

$$F_m = \rho_w \cdot \eta_m \cdot B_C \cdot V_X{}^2 + (\frac{W}{g}) \cdot (\frac{V_X}{dt})$$

ここで

F_m：衝突力，ρ_w：水の密度，η_m：衝突直前の最大遡上水位，B_C：コンテナの幅

V_X：コンテナの漂流速度，W：コンテナ重量，g：重力加速度，dt：衝突時間

[5-012] 容器構造設計基準・同解説，日本建築学会，1968 年

水槽・油槽・ガス槽・サイロ、その他の容器およびこれらを支持する構造の設計においては、機械･化学・建築・土木などの各方面の技術者が関係するが、その考え方がまちまちで統一がとれていないため、これに対応するため本基準が作成されたものである。荷重・応力の算定方法、構造計画、接合、などが説明されている。

[5-013] 実務的手法による津波波力の評価　－直立構造物に作用する波力の数値計算－，土木学会論文集 A1 Vol.65，NO.1，2009 年，鴫原・小竹・岩瀬・藤間

本論分は、構造物に作用する波力・波圧を津波数値シミュレーションから求める手法を紹介している。津波数値シミュレーションは２次元解析、３次元解析の両方を紹介し、ケースバイケースで使い分けることとしている。２次元解析による波力の計算は、抗力式、朝倉式、シマモラの式、の３つの中から選択する。３次元解析による波力の計算は３次元解析から得られる受圧面各位置での圧力を積分して得る。

抗力式：$F = \frac{\rho}{2} \cdot C_d \cdot B \cdot h_i \cdot u_i{}^2$

朝倉式：$F = 4.5 \cdot \rho \cdot h_i{}^2 \cdot B$

シマモラの式：$F = \frac{\rho \cdot g}{2} \cdot \cdot h_f \cdot B$

ここで

F：構造物に作用する水平波力，ρ：水の密度，C_d：抗力係数(角柱の場合 $C_d = 2.0$)

h_i：最大通過波水深，u_i：最大通過波流速，h_f：構造物前面での水深

[5-014] Tohoku Earthquake & Tsunami Event Recap Report，AON BENFIELD，2011 年 8 月

東北大震災の地震・津波による被害をセクターごとに概観している。

[5-015] 津波の河川遡上解析の手引き(案), (財)国土技術研究センター, 平成 19 年 5 月

河川構造物の耐津波性能を評価するために必要となる評価対象津波を作成する方法が述べられている。これは次の非線形長波理論式を解いて求めることとしている。ただし、ソリトン分裂の影響を考慮する場合は､非線形分散長波理論に基づく方程式を用いてもよい。初期条件は、海底面における断層の鉛直変位の分布を海面の初期水位分布として与える。

（非線形長波理論式）

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0$$

運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{g\cdot n^2}{D^{7/3}}M\sqrt{M^2+N^2}=0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{g\cdot n^2}{D^{7/3}}N\sqrt{M^2+N^2}=0$$

（非線形分散長波理論式）

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0$$

運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{g\cdot n^2}{D^{7/3}}M\sqrt{M^2+N^2}$$
$$=\frac{D^2}{3}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial x\partial y}\right)+\nu\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{g\cdot n^2}{D^{7/3}}N\sqrt{M^2+N^2}$$
$$=\frac{D^2}{3}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)+\nu\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)$$

ここで

η：水深（m）　　M, N：x 方向及び y 方向の単位幅当り流量(m2/s)

D：全水深（m）　　g：重力加速度（9.8m/s2）　　n：マニングの粗度係数($m^{-1/3}\cdot s$)

ν：渦動粘性係数(m^2/s)

[5-016] 橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算，第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集 鴫原・藤間・庄司, 2009 年

２次元津波数値シミュレーションから橋梁に作用する波力を求める手法と３次元解析津波数値シミュレーションから橋梁に作用する波力を求める方法を比較し、３次元解析による方法の方が精度がよいと結論している。[4-013]参照のこと。

[5-017] 内水ハザードマップ作成の手引き(案)，国土交通省都市・地域整備局下水道部，平成 21 年 3 月

都市部において、降雨が下水道の雨水排水能力を上回った場合におきる内水氾濫に対するハザードマップの作成方法を説明している。

[5-018] 津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について，建設マネジメント技術 2012 年 2 月、国土交通省住宅局建築指導課，2012 年 2 月

国土交通省住宅局建築指導課がとりまあとめた「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波非難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」の概要を紹介している。

[5-019] 遡上津波の漂流物による被害推定について，国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所・技術開発課第二係・佐藤友紀

大洋を伝播する津波を２次元的にとき、構造物が多数ある臨海部を３次元的にとく津波シミュレーションプログラム STOC と、それを用いた解析事例を紹介している。

[5-020] 津波防災地域づくりに係る技術検討報告書，津波防災地域づくりに係る技術検討会，平成 24 年 1 月

平成２３年１２月に「津波防災地域づくりに関する法律」が成立し、津波防災地域づくりが進められることとなった。この津波防災地域づくりで必要となる技術な知識を取りまとめている。この中で「EMA 津波避難構造物設計ガイドラインにおける洗掘深と浸水深との関係」を記述している。

[5-021] 1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考－津波被害関数の構築に向けて－，日本地震工学会論文集第 10 巻, 第 3 号, 2010 年，越村・萱場

1993 年北海道南西沖地震津波の奥尻島青苗地区における家屋被害(航空写真判読)と想定浸水深(数値シミュレーション)から、津波被害関数を作成したことを紹介している。なお津波被害関数とは以下のようなものと思われる。

津波被害関数は

$$P_D(x)=\int_{-\infty}^{x}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi t}\exp\left(-\frac{(\ln t-\lambda)^2}{2\xi^2}\right)dt$$　　ここで x：浸水深

で表される。そして、これを作成するということは、家屋被害(航空写真判読)と想定浸水深(数値シミュレーション)から ξ,λ をもとめることである。$P_D(x)$ はある浸水深に対して家屋の崩壊確率を表し、0～1の値をとる。$P_D(x)=0$ のとき家屋被害なし、1のときすべての家屋が崩壊すると解釈する。

4.1.2.6　その他の参考となる文献

[6-001]津波防災マニュアル-1章 津波の基礎知識,石垣島地方防災連絡会

浸水高は地表面から水面までの高さ、遡上高は津波が陸地を這い上がり最も高くなったところの基準面からの高さ、痕跡高は基準面から測った痕跡までの高さ、ということが説明されている。

[6-002]現場担当者のための環境リスク対応ハンドブック1～2章

環境リスクとは、高圧ガス、毒物・劇物、危険物などの有害な化学部質が、事業所の事故やトラブルによって環境中に流出し、周辺住民の健康や動植物の生息又は生息に悪影響を及ぼす可能性、であることを説明している。

［6-004］中央防災会議・東南海、南海地震等に関する専門調査会（第16回）参考資料2「5表層地盤の液状化計算方法」

液状化可能性指数PLを以下のように解釈することを記述している。

$PL>15$：液状化の可能性が大、$5<PL\leq 15$：液状化の可能性が中

4.1.2.7　追加して収集した文献

[7-001] FEMA(2008), Design and Construction Guidance for Breakaway Walls

ブレークアウェイ壁をどのように設計するかが記されている。ブレークアウェイ壁とは津波波力を低減するため、津波がきたら１階部分の壁が意識的に壊れるようにしたものである。壁がなくなることにより津波が一階部分を素通りし、建物に作用する津波力が小さくなる。

[7-002] FEMA(1999), Protecting Building Utilities From Flood damage

ビル設備を津波から守るための設計概念を説明している。ビル設備とは、暖房・空調・冷房設備、燃料タンクとその配管系、電気設備、下水系統、上水系統を言う。それらを守る基本的方法は、設計浸水深より高い位置にそれらを配置することとなっている。

[7-003] FEMA(2011),Coastal Construction Manual

本書は海岸域に民家を建てる場合の手引である。対象とする災害気象はハイケーン等による海岸域洪水、基礎の浸食、強風、地震で、建物は一戸建または3階建以下集合住宅である。主に高床式の木造建築を解説している。記述内容は、過去のハリケーンなどによる建物被害とそれに至ったメカニズムのレビューから始まり、立地場所に関わること、災害気象からくる荷重、建物の基礎の設計、建物の外装の設計、などが説明されている。

[7-004] JLPA(2004),球形貯槽基準 JLPA201:2004

球形貯槽の構造及び構造計算方法が記述されている。

[7-005] JLPA(2012)絆 JLPA 東日本大震災における LP ガス関連設備の被災及び対応状況

東日本大震災で被災した LP ガス施設の写真が掲載されている。

[7-006] (1971) Handbook of Structural Stability

収集文献 4-002「高圧ガス設備等耐震対策推進委員会報告書」に外圧座屈の計算例が示されている。その計算式が本ハンドブックに示されている。なお、本ハンドブックはシェル構造物のいろいろな形状および荷重パターンにおける座屈荷重の計算式とそのオリジナル論文名が記述されているもので、式の誘導や理論的背景等は記述されていない。

[7-007] NKSJ-RM レポート 58 東日本大震災レポート 第 12 報(石油コンビナートの地震火災について)

東日本大震災における石油コンビナートの地震火災事例とその特徴について取りまとめている。特徴として、①同時多発、②各種危険物・可燃ガスが併存、③公設消防にたよれない、④長時間停電、⑤消化薬剤の不足、⑥泡調合器の能力不足、⑦ガス火災の消化困難性、⑧BLEVE の危険性、を挙げている。また、石油コンビナートの優位点として、①海上

からの消化活動が可能、②消火に海水が利用できる、③近隣の応援協定により強力な自衛消防力が発揮できる、④自衛消防隊の訓練が定期的に行なわれているため、自衛消防隊は消防機材の取り扱いに慣れている、⑤民家との間に十分な距離があり、民家に大きな損害を及ぼす危険がすくない、を挙げている。

[7-008] 津波対策の推進に関する法律案(可決：平成 23 年 6 月 24 日公布)

本法律は、国、都道府県、市町村が推進する津波対策を述べている。

[7-009] 津波非難ビル等に係るガイドライン

避難ビル設計用津波荷重を以下のように計算することを巻末資料②に記している。

（１）津波波圧算定式

構造設計用の進行方向の津波波圧は、下式により算定する。

$$qz = \rho g(3h - z) \quad \text{----------} \quad (4.1)$$

ここに、 qz： 構造設計用の進行方向の津波波圧(kN/m^2)

ρ： 水の単位体積質量(t/m^3)

g： 重力加速度(m/s^2)

h： 設計用浸水深(m)

z： 当該部分の地盤面からの高さ（0≦z≦3h）(m)

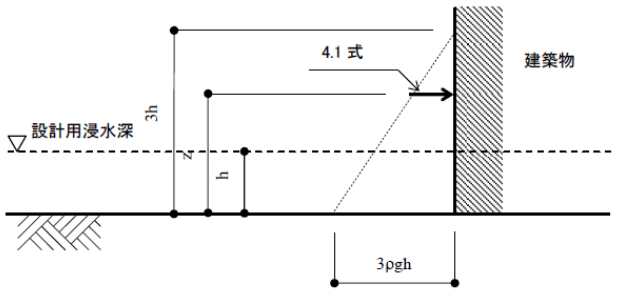


図 4-1 4.1 式による津波波圧

図 4.1.2.7.1

（２）津波波力算定式

構造設計用の進行方向の津波波力は、4.1 式の津波波圧が同時に生じると仮定し、下式により算定する。

$$Qz = \rho gB\int_{z_1}^{z_2}(3h - z)dz = \frac{1}{2}\rho gB\left\{\left(6hz_2 - {z_2}^2\right) - \left(6hz_1 - {z_1}^2\right)\right\} \quad \text{-------- (4.2)}$$

ここに、 Qz： 構造設計用の進行方向の津波波力(kN)

B： 当該部分の幅(m)

z_1： 受圧面の最小高さ （$0 \leqq z_1 \leqq z_2$） (m)

z_2： 受圧面の最高高さ （$z_1 \leqq z_2 \leqq 3h$） (m)

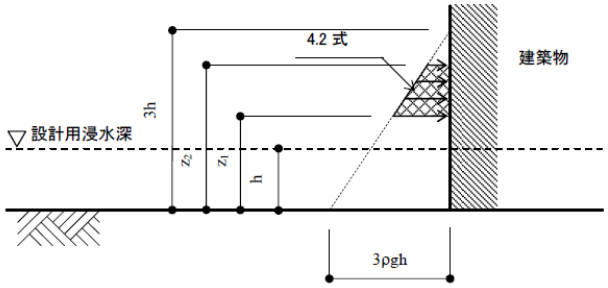


図 4-2 4.2 式による津波波力

図 4.1.2.7.2

[7-010] 地上二重殻式低温タンク保冷工法について

平底円筒形貯槽の構造が記述されている。

[7-011] A PHYSICAL INTRODUCTION TO FLUID MECANICS 10.6 DRAG OF BLUFF AND STREAMLINED BODIES & TABLE C.3 in APPENDIX C

横置円柱の抗力係数の値について記述している。

[7-012] 河川砂防技術基準調査編　河川における洪水流の水理解析

河川構造物の流体力の推定法が記述されている。具体的には、水理公式集[平成 11 年度版] PP.212-218 を参照することを指示している。

[7-013] 水理公式集[平成 11 年度版] PP.212-218

橋脚が流水によって受ける抗力は、形状抗力と造波抗力よりなり、形状抗力は $F_r = \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot C_f\cdot A_f\cdot u^2$ で計算する。ここで、F_r：形状抗力、ρ：流水密度、C_f：形状抵抗係数、A_f：流れ方向の橋脚の投影面積、u：平均流速

[7-017] 改訂三版標準水理学
静水圧の英語表記を参照した

[7-018] 橋梁に作用する津波流体力と流況に関する SPH 法解析、村上・BUI・中尾・伊津野、第 30 回土木学会地震工学会発表会論文集
ダムブレーク実験およびそのシミュレーションにより橋梁に作用する津波波力を評価している。

[7-019] 津波衝突時に橋桁に作用する波力、片岡・日下部・長屋、第 12 回日本地震工学シンポジウム
水路での模型実験により、橋梁に働く衝撃力と水平流体力を評価している。

[7-020] パワーポイント:Tsunami Load Determination for On-Shore Structures
衝撃力と流体力の関係を示す実験値グラフが掲載されている。

[7-021] Lesson 2.6-Impluse Impulsive force and safety feature
http://keterehsky.files.wordpress.com/2010/08/lesson-2-6-impulse-impulsive-force_-and_-safety-feature.pdf から取得
衝突力について説明している。

[7-022] JLPA202:2005　横置円筒形貯層基準
横置円筒形貯槽の構造及び構造計算方法が記述されている。

[7-023] 物部水理学 [13.5]段波
ダムブレーク・シミュレーションにおける解析解式が記述されている。

[7-024] ASCE/SEI 24-05, Flood Resistant Design and Construction (American Society of Civil Engineers (ASCE)：米国土木学会)
洪水に対抗できる建物の設計の規格を定めている。1.5.2 に最下階を設計浸水深より高くすることと記述していることから、高床式の構造をとる内容となっていると考えられる。

[7-025] ASCE/SEI 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings

既存構造物の地震に対する挙動を改善する方法を定めている。1.1 と FigureC1-1 の記述から、これは、構造物に対して機能が不足する構造要素を地震評価により選び出し、必要な機能をあてがう改良の設計を行うものであると考えられる。

[7-026] SEI/ASCE 7-02, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

ビルディング及びその他の構造物を設計するに必要な最小限の荷重を説明している。Section2.0 に荷重の組み合わせ、Section5.0 に洪水荷重が記述されている。

[7-027] ASCE/SEI 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

収集資料[7-026]の改訂バージョンである。

４．１．３　特記する技術要素

4.1.3.1　FEMA 報告書に記載されている津波が建物に及ぼす力の計算式

Guideline for design of Structures for vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA’に記述されている津波が建物に及ぼす力の式。

(1)流体の静水力

$$F_h = \rho_s \cdot g \cdot (h_{\max} - \frac{h_w}{2}) \cdot b \cdot h_w$$

ここで、

F_h：壁に加わる力（N），ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

g：重力加速度（$9.8m/s^2$），$h_{\max}$：壁の付け根から水面までの高さ（m）

h_w：壁の付け根から壁の上端までの高さ（m），b：壁の長さ（m^3）

なお、$h_{\max}$は、$h_{\max} = 1.3 \cdot R^* - z_w$で求める。ここで、$R^*$は津波の遡上高（$m$）、$z_w$は壁の付け根の標高（$m$）である。

(2)浮力

$$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V$$

ここで、

F_h：浮力（N），ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

g：重力加速度（$9.8m/s^2$），V：氾濫水に沈んだ建物内の空隙部分の体積（m^3）

(3)流体力

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max}$$

$$(hu^2)_{\max} = g \cdot R^2 \cdot (0.125 - 0.235 \cdot \frac{z}{R} + 0.11 \cdot (\frac{z}{R})^2)$$

$$R = 1.3 \times R^*$$

ここで、

F_d：流体力（N），ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

C_d：形状抵抗係数(無単位,推奨値 2.0)，B：構造物の幅（m），h：水深（m）

u：速度（m/s），g：重力加速度（$9.8m/s^2$），R^*：遡上高，z：水位(水深+標高，m）

(4)衝撃力

$$F_s = 1.5 \cdot F_d$$

(5)浮遊物による衝撃力

$$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} \qquad (6.8)$$

ここで、

F_i：衝撃力（N），　C_m：質量定数(無単位，推奨値 2.0，原文 added mass coefficient)

$u_{\max}$:最大流速（m/s），　k:有効剛性（N/m），　m:浮遊物の質量（kg）

（※　有効剛性：k　　$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_m}$　　k_l：浮遊物の剛性　　k_m：構造物の剛性）

(6)瓦礫浮遊物をせき止めるとき発生する流体力

$$F_{dm} = \frac{1}{2} \rho_s C_d B_d (hu^2)_{\max}$$

$$(hu^2)_{\max} = g \cdot R^2 \cdot (0.125 - 0.235 \cdot \frac{z}{R} + 0.11 \cdot (\frac{z}{R})^2)$$

$$R = 1.3 \times R^*$$

ここで、

F_{dm}：堆積浮遊物による流体力（N），ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

C_d：形状抵抗係数(無単位,推奨値 2.0)，B_d：瓦礫浮遊物の堆積の幅（m），h：水深（m）

u：速度（m/s），g：重力加速度（$9.8m/s^2$），R^*：遡上高，z：水位(水深+標高，m）

(7)床を持ち上げる力

$F_{up} = F_b + F_u$　F_b：浮力，F_u：流体の z 方向速度

$$F_b = \rho_s \cdot g \cdot A_f \cdot h_b, \quad F_u = \frac{1}{2} \cdot C_u \cdot \rho_s \cdot A_f \cdot u_v^2, \quad u_v = u \cdot \tan\alpha$$

ρ_s：流体密度，g：重力加速度，A_f：床面積，h_b：床までの水深，C_u：定数(通常 3.0)

u_v：流体の垂直方向速度又は上昇速度，u：水平速度，α：地面の傾斜角

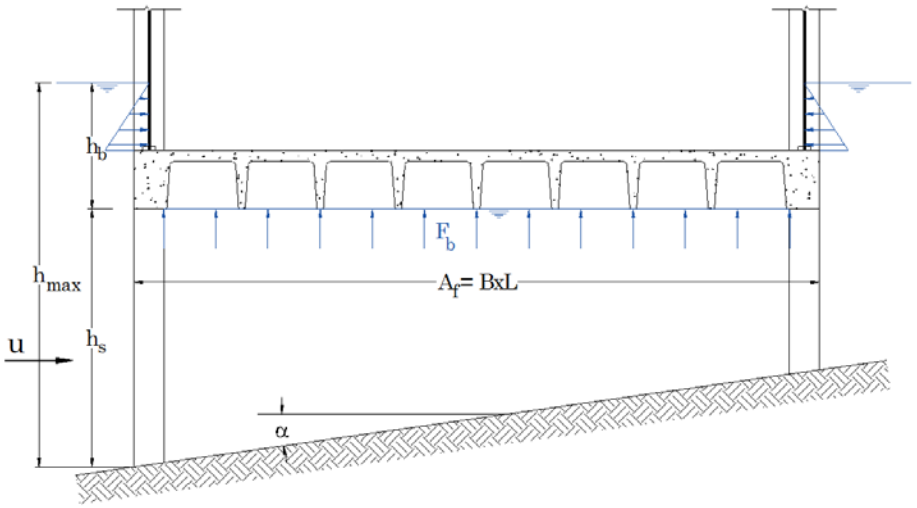


図 4.1.3.1

(8)床にのしかかる力

$$F_r = \rho_s \cdot g \cdot A_f \cdot h_r, \quad h_r = h_{\max} - h_1$$

ρ_s：流体密度，g：重力加速度，A_f：床面積，$h_r, h_{\max}, h_1$：下図参照のこと

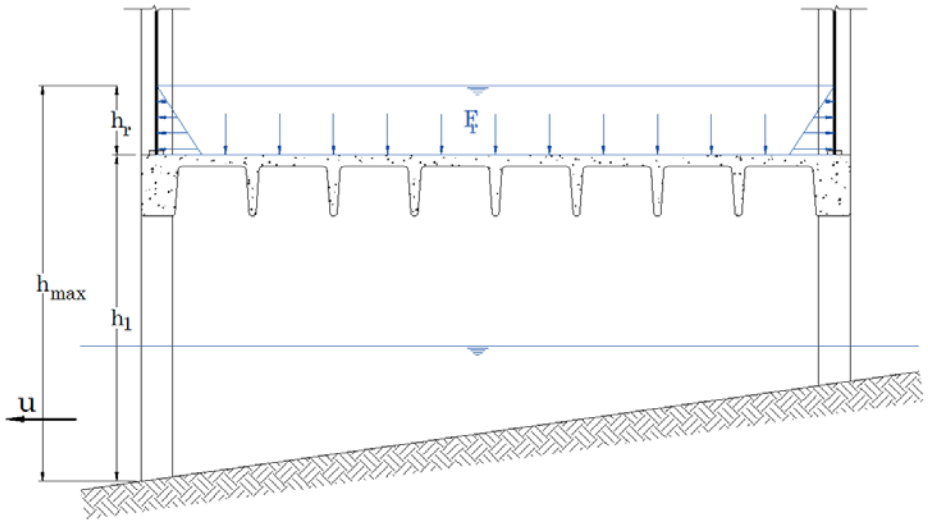


図 4.1.3.2

4.1.3.2　津波シミュレーション基礎式（浅水方程式）

（１）連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0$$

ここで

h　：水深（ｍ）

M：x 方向の単位幅当り流量(m**2/s)

N　：y 方向の単位幅当り流量(m**2/s)

（２）運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial (uM)}{\partial x}+\frac{\partial (vM)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-f_x$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial (uN)}{\partial x}+\frac{\partial (vN)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-f_y$$

h　：水深（ｍ）

H　：水位（ｍ）

M：x 方向の単位幅当り流量(m**2/s)

N：y 方向の単位幅当り流量(m**2/s)

u：x 方向の流速(m/s)

v：y 方向の流速(m/s)

f_x：摩擦力(マニング則)　　$f_x=\dfrac{g\cdot n^2\cdot u\cdot\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}}$

f_y：摩擦力(マニング則)　　$f_y=\dfrac{g\cdot n^2\cdot v\cdot\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}}$

n　：マニングの粗度係数

4.1.3.3「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書」に記載れている被害

表 4.1.3.3.1　石油タンクの津波被害例

	津波名称	被害の種類	概要
1	1944 年東南海地震津波	漂流	高さ 7m の津波で重油タンクが 300m 以上流された
2	1946 年南海地震津波	滑動	引き波で重油タンクが 4m 移動した
3	1960 年チリ地震津波	浮上り	痕跡高 3.8m でタンクが押し流された
4	1964年アラスカ地震津波	浮上り・漏洩・火災	10～13m の津波でタンクが傾き、油が流出し、さらに火災となった
5	1964 年新潟地震津波	漏洩・火災	タンクから流出したガソリンが津波で拡散し、さらに火災となった
6	1968 年十勝沖地震津波	漏洩	重油の流出
7	1983年日本海中部地震津波	漂流・漏洩	130 m^3の軽油タンクが 19m 移動し、軽油が 48m m^3流出した
8	2004年スマトラ沖地震津波	漂流・座屈	タンクが数 100m 滑動 移動したタンクによる坊油堤の破壊 容量 2000t 満液タンクが 3km 滑動 容量 1500t 空タンクの側板がへこんだ

表 4.1.3.3.2　石油タンクの浸水被害例

	津波名称	被害の種類	概要
1	1959 年伊勢湾台風	漂流・漏洩	高潮により石油タンクが 4km 漂流
2	1999 年不知火・周防灘被害	漂流	高潮により 1m 冠水し、小型タンクが 30m 漂流
3	2005年ハリケーンカタリーナ被害	漂流・漏洩	高潮によりタンクが 4km 漂流 380 m^3以上の石油流出が 5 施設 380 m^3以下の石油流出が 134 施設

4.1.3.4 ［1-004]危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書に示されている予測式

ここに記述した予測式は、平底円筒形の石油タンクに対するものである。本報告には防油壁に対する式も述べられているが、ここでは省略する。

(1) 浮き上がりが起こるかどうかの予測式

浮き上がり安全率　$F_{Sa}=\dfrac{W_T+W_L}{T_{tV}}$

を計算し、$F_{Sa}\geq 1.0$のとき浮き上がらず、$F_{Sa}\leq 1.0$のとき浮き上がる。

ここで、W_T：タンク本体重量, W_L：内溶液重量, T_{tV}:津波の鉛直波力。

(2)　滑動が起こるかどうかの予測式

滑動安全率　$F_{Sb}=\dfrac{\mu(W_T+W_L-F_{tV})}{F_{tH}}$

を計算し、$F_{Sb}\geq 1.0$のとき滑動せず、$F_{ba}\leq 1.0$のとき滑動する。

ここで、μ：タンク基礎とタンク本体の間の摩擦係数

W_T：タンク本体重量, W_L：内溶液重量, F_{tV}:津波の鉛直波力, T_{tH}:津波の水平波力。

(3) 転倒が起こるかどうかの予測式

転倒安全率　$F_{Sc}=\dfrac{M_W-M_{tV}}{M_{tH}}$　，　M_W：抵抗モーメント　$M_W=(W_T+W_L)\cdot R$

を計算し、$F_{Sc}\geq 1.0$のとき転倒せず、$F_{Sc}\leq 1.0$のとき転倒する。

ここで、T_{tV}:津波の鉛直モーメント, T_{tH}:津波の水平モーメント

W_T：タンク本体重量，W_L：内溶液重量，R:タンクの半径

(4) 諸量

(a)水平波力

$$F_{tH}=\frac{1}{2}\int_{-\pi}^{\pi}\rho g[h_x^{\max}(\theta)]^2\cdot R\cdot\cos\theta\cdot d\theta,\quad h_x^{\max}(\theta)=\alpha\eta_{\max}\sum_{m=0}^{3}p_m\cos m\theta$$

ρ:流体の密度, g:重力加速度, R:タンクの半径

α:タンク水平波力に係る水深係数（たとえば 1.8）, $\eta_{\max}$:最大浸水深

$p_0=0.720$, $p_1=0.308$, $p_2=0.041$, $p_3=-0.042$

θ：タンクの周方向位置を表すラジアン角度（津波と向き合う位置が零）

(b)鉛直波力

$$F_{tV}=2\int_{0}^{\pi}\rho g h_V^{\max}(\theta)R^2\cos^2\theta\cdot d\theta,\quad h_V^{\max}(\theta)=\beta\eta_{\max}\sum_{m=0}^{3}q_m\cos m\theta$$

ρ:流体の密度, g:重力加速度, R:タンクの半径

β:タンク鉛直波力に係る水深係数（たとえば 1.2）, $\eta_{\max}$:最大浸水深

$q_0=0.720$, $q_1=0.308$, $q_2=0.041$, $q_3=-0.042$

θ：タンクの周方向位置を表すラジアン角度（津波と向き合う位置が零）

(c)水平モーメント

$$M_{tH}=\frac{1}{6}\int_{-\pi}^{\pi}\rho g[h_x^{\max}(\theta)]^3\cdot R\cdot\cos\theta\cdot d\theta,\quad h_x^{\max}(\theta)=\alpha\eta_{\max}\sum_{m=0}^{3}p_m\cos m\theta$$

ρ:流体の密度, g:重力加速度, R:タンクの半径

α:タンク水平波力に係る水深係数（たとえば 1.8）, $\eta_{\max}$:最大浸水深

$p_0=0.720$, $p_1=0.308$, $p_2=0.041$, $p_3=-0.042$

θ：タンクの周方向位置を表すラジアン角度（津波と向き合う位置が零）

(d)鉛直モーメント

$$M_{tV}=2\int_{0}^{\pi}\rho g h_V^{\max}(\theta)R^3\cos^2\theta(1+\cos\theta)d\theta,\quad h_V^{\max}(\theta)=\beta\eta_{\max}\sum_{m=0}^{3}q_m\cos m\theta$$

ρ:流体の密度, g:重力加速度, R:タンクの半径

β:タンク鉛直波力に係る水深係数（たとえば 1.2）, $\eta_{\max}$:最大浸水深

$q_0 = 0.720$， $q_1 = 0.308$，$q_2 = 0.041$，$q_3 = -0.042$

θ：タンクの周方向位置を表すラジアン角度（津波と向き合う位置が零）

(5)内外水圧差による側板座屈が起こるかどうかの予測

$A \cdot H_0^2 + B \cdot H_0 + C = 0$ の H_0 を、$H_0 = \dfrac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ で解いて、$H_0 \geq \eta_{\max}$ なら座屈せず、

$H_0 \leq \eta_{\max}$ なら座屈する。ここで、

$$A = \frac{\rho \cdot g}{2} \frac{R \cdot L^2}{\pi^2 D}, \quad B = \left(\frac{\rho_1 \cdot g}{2} \frac{R \cdot L^2}{\pi^2 D} H_1 + 0.3168 \cdot Z^{1/2}\right)$$

$$C = -1.152 \cdot L \cdot Z^{1/2}, \quad D = \frac{E \cdot H^3}{12 \cdot (1 - \upsilon^2)}$$

ρ：津波の流体密度，　ρ_1：タンク内溶液の流体密度，g：重力加速度

D：曲げ剛性，E：ヤング率，Z：形状係数，ν：ポアソン比

L：タンク高さ，R：タンクの半径，H_1：タンク内溶液の高さ，H：側板の厚さ

4.1.3.5　耐震設計における設計設備の種類

高圧ガス設備等耐震設計指針(2012)レベル1耐震設計性能評価(耐震設計設備・基礎)編の表2.1を下記に示す。

(表2.1)　応力を算定する部位及びその種類

耐震設計設備の種類		応力を算定する部位	算定応力の種類				
			引張	せん断	曲げ	圧縮	座屈
塔類	スカート支持のもの	胴板	○			○	○
		スカート				○	○
		基礎ボルト	○				
		ベースプレート			○		
	レグ支持のもの	胴板	○			○	○
		レグ	○	○	○	○	○
		基礎ボルト	○	○			
	ラグ支持のもの	胴板	○			○	○
		セットボルト	○				
球形貯槽		上部支柱		○	○	○	
		下部支柱			○	○	○
		ブレース	○			○(鋼管ブレースに限る)	○(同左)
		基礎ボルト	○	○ どちらかで可			
		シアープレート		○ どちらかで可	○		
		ベースプレート			○		
横置円筒形貯槽(2点支持のもの)		胴のサドル部	○			○	○
		胴の中央部(軸方向)	○			○	○
		鏡 $\left(\frac{A}{R_m} \leqq 0.5 \text{ のとき}\right)$	○				
		サドル				○	○
		基礎ボルト	○	○ どちらかで可			
		シアープレート			○		
平底円筒形貯槽 ($D \leqq 20$ m、かつ $H/D \leqq 1.25$ のもの)		側板					○
		アンカーストラップ	○				
架構		支柱			○	○	○
		はり	○	○	○	○	○
		ブレース	○			○	○
		基礎ボルト	○	○			
		その他耐震上主要な部分					

図 4.1.3.5.1

４．１．４　津波・被災貯槽のヒアリング調査

東日本大震災の津波により被災した高圧ガス設備は多岐にわたっている。そのなかで実際に津波により流出した事例があり、かつ、漏えいした可燃性ガスによる火災・爆発が発生した場合に周辺地域に対して与える影響が大きいと考えられる液化石油ガス円筒形貯槽を主体に調査を実施した。併せて、津波に被災したが流出はしなかった同型の貯槽についても調査を行った。

また、今後の調査に必要と考えられる球形貯槽及び平底円筒形貯槽についても基礎調査を行った。

4.1.4.1　調査項目

貯槽に対して津波の波力、貯槽の浮力、漂流物が及ぼす影響等を評価するために必要と考えられる調査項目を次に示す。

（１）円筒形貯槽

１）津波に対する情報

①標高

②浸水深

２）波力等を計算するのに必要な寸法

①貯蔵能力

②貯槽の全長

③貯槽の外径

④貯槽の内径

⑤本体重量

⑥基礎高さ

⑦貯槽下部までの地上高

３）基礎ボルトの安全性を確認するのに必要なデータ

①基礎ボルトの寸法

②基礎ボルトの材質

③基礎ボルトの本数

（２）球形貯槽

１）津波に対する情報

①標高

②浸水深

２）波力等を計算するのに必要な寸法

①貯蔵能力

②球殻内径

③球殻厚さ

④本体重量

⑤ベースプレートの寸法

⑥ベースプレートの重量

⑦ベースプレートから球殻中心までの高さ

３）基礎ボルトの安全性を確認するのに必要なデータ

①支柱本数

②支柱１本当たりのボルト本数

③基礎ボルトの寸法

④基礎ボルトの材質

⑤基礎ボルトの本数

（３）平底円筒形貯槽

１）津波に対する情報

①標高

②浸水深

２）波力等を計算するのに必要な寸法

①貯蔵能力

②外槽の直径

③外層の側板高さ

④外層の屋根半径

⑤外層の本体重量

⑥内槽の直径

⑦内槽の側板高さ

⑧内槽の屋根半径

⑨内槽の本体重量

３）外槽の強度に対する安全性を確認するのに必要なデータ

①基礎コンクリートの設計基準強度

4.1.4.2　調査結果

（１）円筒形貯槽

円筒形貯槽の調査データについては表 4.1.4-1 に示す。

表4.1.4-1　津波に被災した液化石油ガス貯槽一覧表

地区	事業所名	貯槽タイプ	貯蔵能力（プロパン級）[ton]	内容積[m3]	全長[mm]	外径[mm]	内径[mm]	貯槽本体重量[ton]	貯槽下部の地上高[m]	基礎の高さ[m]	基礎ボルト・ナット		基礎ボルト間距離（周方向）[mm]	設置年月	ガス名	被災時の貯蔵量[ton]	海岸からの距離[km]	貯槽・長軸方向の方位	地震震度	浸水深[m]	遡上高[m]	備考
											寸法（本数）	材質										
流出した貯槽																						
岩手県宮古市	A事業所	横置円筒形貯槽	20	47	10,134	2,524	2,500	約11	約1.6	約1.5	W1 1/4×600（4本）	SS400	2,200	1968_8	プロパン	約12	約0.7	北西―南東	5弱	約8.5m以上	約10m	標高約2m約500m、津軽石川・右岸付近へ流出
	B事業所	横置円筒形貯槽	30	70.5	12,040	2,826	2,800	約14.1	約1.9	約1.85	W1×L型(400×100)（4本）	SS41B（SS400）	2,000	1966_10	プロパン	約18	約1	東―西	5強	約8m以上	約10m	標高約3m約700m、津軽石川・右岸付近へ流出
岩手県大船渡市	C事業所	横置円筒形貯槽	15	35.31	7,638	2,528	2,500	約8.2	約1.54	約1.4	M30×400（8本）	SD295	2,000	1983_3	ブタン	約6	約1	南―北	6強	約7～10m	約9m	標高約3m約300m、山側へ流出
岩手県陸前高田市	D事業所	横置円筒形貯槽	20	47.72	10,090	2,524	2,500	約9.3	約1.3	約1.25	M24×500（4本）	SD30	1,800	1973_1	プロパン	不明	約1.5	東―西	6弱	約10m以上	約20m	標高約16m約20m、山側へ流出
宮城県気仙沼市	E事業所	横置円筒形貯槽	20	47	10,100	2,528	2,500	約11	約1.65	約1.5	M30×400（8本）	SD30	2,000	1977_11	プロパン	約10	約0.5	北西―南東	6弱	約5m	約12m	標高約5m約500m、面瀬川上流の橋桁まで流出
流出しなかった貯槽																						
岩手県釜石市	F事業所	横置円筒形貯槽	15	35.971	7,690	2,524	2,500	約7.5	約1.75	約1.7	W1×L型(400×100)（4本）	SS41B	1,800	1966_11	プロパン	約7	約0.6	北東―南西	6強	約2～3m	約10m	標高約5m
		たて置円筒形貯槽	15	35.77	7,690	2,524	2,500	約10	約1.5	―	M24×750（12本）	SD30	φ2,760	1971_2	プロパン	約7		―				
宮城県多賀城市	G事業所	横置円筒形貯槽	20	47.0	10,050	2,526	2,500	11.23	1.637	1.400	M30×415（8本）	SD295A	2,000	1978_11	プロパン	約8	約1	東北東―西南西	7	約2.5m	約4m	標高約3m
		横置円筒形貯槽	20	47.0	10,050	2,526	2,500	11.59	1.637	1.400	M30×415（8本）	SD295A	2,000	1979_10	ﾌﾞﾀﾝ(80%)＋ﾌﾟﾛﾊﾟﾝ(20%)	約14						

注）遡上高は日本地理学会・津波被災マップを参考にした。（＜参考資料＞枠内数字）

1）流出した液化石油ガス横置円筒形貯槽

次の４地区・５事業所における貯槽５基について、当該貯槽及び高圧ガス製造者が保管していた関係書類が流出しているため東北地区の検査事業者及び貯槽製造者からヒアリング調査を実施した。

地区：①岩手県宮古市（A事業所：１基、B事業所：１基）
②岩手県大船渡市（C事業所：１基）
③岩手県陸前高田市（D事業所：１基）
④宮城県気仙沼市（E事業所：１基）

・流出した貯槽は５基とも横置円筒形貯槽であり、その設置年は昭和４１～５８年、貯蔵能力（プロパン換算）は１５～３０トン、貯蔵ガスはプロパン４基及びブタン１基であった。貯槽の設置場所は海岸からの距離が約 0.5～1.5km、地震震度が５弱～６強、浸水深が約 5～10m 以上であった。

・A事業所、B事業所及びD事業所における昭和４０年代製貯槽３基の基礎ボルトの寸法、材質はそれぞれ W1-1/4（SS400）、W１（SB41B）及び M24（SD30）であり、その本数は各４本であった。

・C事業所及びE事業所における昭和５０年代製貯槽２基の基礎ボルトの寸法、材質は M30（SD295）及び M30（SD30）であり、その本数は各８本であった。
近年の標準的な貯蔵能力１０～３０トン貯槽の基礎ボルト（M30、所要本数８本）仕様であっても貯槽が流出している。

・A事業所の基礎ボルト（W1-1/4、４本固定）は基礎から貯槽とともに抜け落ち大きく曲がった状態であった。

・D事業所の基礎ボルト（M24、４本固定）は基礎に残っており、基礎ボルトは大きく曲がり、座金は変形した状態で、貯槽は基礎ボルト、ナット、座金から抜け脱落した状態であった。

・流出した貯槽が設置されていた場所は、沿岸部から約 0.5～1.5km と海に近く、貯槽はリアス式海岸の地形的影響と思われる浸水深が約 5～10m 以上となる非常に大きな津波の流体力、衝撃力等を受けたと考えられる。また、貯槽によっては設置場所が河川敷又はその付近であったため河川を遡上する津波の影響を大きく受けたと考えられる。

＜宮古・A事業所＞

流出した貯槽（図 4.1.4-1）の基礎から抜けた基礎ボルト（W1-1/4、４本固定）は大きく曲がった状態であったが切断はしていなかった。（図 4.1.4-2 参照）

図 4.1.4-1　宮古・A事業所の流出した貯槽（提供：H検査事業者）

図 4.1.4-2　基礎ボルト・ナット、貯槽のサドル（提供：H検査事業者）

基礎（コンクリート基礎）は津波下流側の基礎ボルト付近のコンクリートが大きく破損し、基礎ボルトが抜け落ちた状態が確認できる。図 4.1.4-4 の基礎ボルト埋込部の状況及び昭和４３年に設置した貯槽であることから、基礎ボルトは基礎にコンクリート又はモルタルにより固定した構造と思われる。(図 4.1.4-3 及び図 4.1.4-4 参照)

図 4.1.4-3　貯槽の基礎（図の奥が海側、提供：H検査事業者）

図 4.1.4-4　基礎の基礎ボルト埋込部（提供：H検査事業者）

＜陸前高田・Ｄ事業所＞

流出した貯槽の基礎ボルト（M24、４本固定）は基礎に残っており、図 4.1.4-5 より変形した座金及び図 4.1.4-6 より大きく曲がった基礎ボルトが確認できる。

なお、基礎ボルトの設置工法は確認できなかった。

図 4.1.4-5　流出した貯槽、基礎の基礎ボルト・座金

（出典：ＪＬＰＡ発行「絆」、提供：Ｓ検査事業者）

図 4.1.4-6　基礎の基礎ボルト・ナット（出典：ＪＬＰＡ「絆」）

（出典：ＪＬＰＡ発行「絆」、提供：Ｓ検査事業者）

２）流出しなかった液化石油ガス円筒形貯槽

次の２地区・２事業所における貯槽４基について、釜石地区の貯槽にあっては東北地区の検査事業者及び貯槽製造者からヒアリング調査を、多賀城地区の貯槽にあっては高圧ガス製造事業者への現地調査並びに貯槽製造者からヒアリング調査を実施した。

地区：①岩手県釜石市（Ｆ事業所：２基）

②宮城県多賀城市（Ｇ事業所：２基）

・今回調査した流出をしなかった貯槽４基は横置円筒形貯槽３基及びたて置円筒形貯槽１基で設置年は昭和４１～５４年、貯蔵能力（プロパン換算）は１５～２０トン、貯蔵ガスはプロパン３基及びオートガス（ブタン(80%)＋プロパン(20%)）１基であった。貯槽の設置場所は海岸からの距離が約 0.6～1km、地震震度が６強～７、浸水深が約 2～3m であった。

・Ｆ事業所の横置円筒形貯槽１基及びたて置円筒形貯槽１基は昭和４０年代製貯槽で、その基礎ボルト寸法・本数はそれぞれＷ１×４本及びM24×１２本であった。

・Ｇ事業所の横置円筒形貯槽２基は昭和５０年代製貯槽で、その基礎ボルト寸法・本数は２基ともM30×８本であった。

・浸水深が 2～3m であった事業所では、高圧ガス設備に大きな影響を与える破損、流出等は発生していなかった。

＜多賀城・G事業所＞

浸水深 2.5m で流出しなかった横置円筒形貯槽については、貯槽本体、弁類、配管類等に変形、損傷等はなかった。（図 4.1.4-7 及び図 4.1.4-8 参照）

図 4.1.4-7　貯槽の全景

図 4.1.4-8　貯槽の弁類、配管

貯槽の基礎、基礎ボルト・ナット（M30×８本）等についても緩み、変形、損傷等はなかった。（図 4.1.4-9 及び図 4.1.4-10 参照）

図 4.1.4-9　貯槽の基礎

図 4.1.4-10 貯槽の基礎ボルト・ナット、サドル

（２）球形貯槽

宮城県仙台市のＨ事業所における球形貯槽１２基について現地調査を行い、その調査結果の概要を次に示す。

１）津波に対する情報

①標高：4.4m

②浸水深：2.6m

２）波力等を計算するのに必要な寸法

①貯蔵能力：800ton 級×４基、900ton 級×３基、1200ton 級×３基、
1400ton 級×２基

②球殻内径：約 16～18m

③球殻厚さ：約 11～38mm

④本体重量：142～358ton

⑤ベースプレートの寸法：930～1180mm φ

⑥ベースプレートの重量：0.2216～0.4697ton

⑦ベースプレートから球殻中心までの高さ：10310～11445mm

３）基礎ボルトの安全性チェックを計算するのに必要なデータ

①支柱本数：8～12 本

②支柱１本当たりのボルト本数：2～4 本

③基礎ボルトの寸法、材質、本数：W1-3/4(SS41)×24、W2-1/4(SS41)×24、
M42(SN87)×32、M64(SS400)×16

球形貯槽の設置区域の浸水深は 2.6m であったが、貯槽本体、弁類、配管類、基礎、支柱等に変形、損傷等はなかった。（図 4.1.4-11 及び図 4.1.4-12 参照）

図 4.1.4-11　球形貯槽の下部

図 4.1.4-12　貯槽の基礎、支柱

球形貯槽の基礎、基礎ボルト・ナット等にも変形、損傷等はなかった。
（図 4.1.4-13 及び図 4.1.4-14 参照）

図 4.1.4-13　貯槽の基礎、支柱

図 4.1.4-14 貯槽の基礎ボルト・ナット

球形貯槽については一部の基礎付近に洗掘の痕跡が見られたが、貯槽本体、基礎、基礎ボルト・ナット等に影響を及ぼすものではない。（図 4.1.4-15 及び図 4.1.4-16 参照）

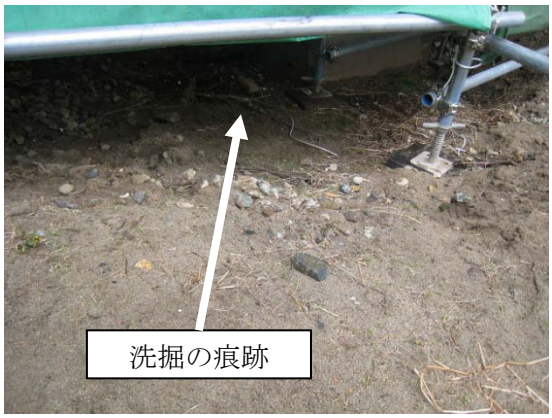


図 4.1.4-15　貯槽基礎付近の洗掘の痕跡

図 4.1.4-16　貯槽基礎付近の洗掘の痕跡

（３）平底円筒形貯槽

宮城県仙台市のH事業所における平底円筒形貯槽６基について現地調査を行い、その調査結果の概要を次に示す。

１）津波に対する情報

①標高：3.6m

②浸水深：2.8～4.8m

２）波力等を計算するのに必要な寸法

①貯蔵能力：15000～45000ton

②外槽の直径：37700～64000mm

③外層の側板高さ：26295～28069mm

④外層の屋根半径：31100～51650mm

⑤外層の本体重量：250.3～1135.3ton

⑥内槽の直径：36600～　62700mm

⑦内槽の側板高さ：24750～25500mm

⑧内槽の屋根半径：30500～51000mm

⑨内槽の本体重量：373.6～1651.4ton

３）外槽の強度に対する安全性を計算するのに必要なデータ

①基礎コンクリートの設計基準強度：210kg/cm^2

平底円筒形貯槽の設置区域の浸水深は 2.8～4.8m であった。浸水深 4.8m であった貯槽については一部の基礎付近に洗掘の痕跡が見られたが、貯槽本体、基礎、基礎ボルト・ナット等に影響を及ぼす変形、損傷等はなかった。（図 4.1.4-17 及び図 4.1.4-18 参照）

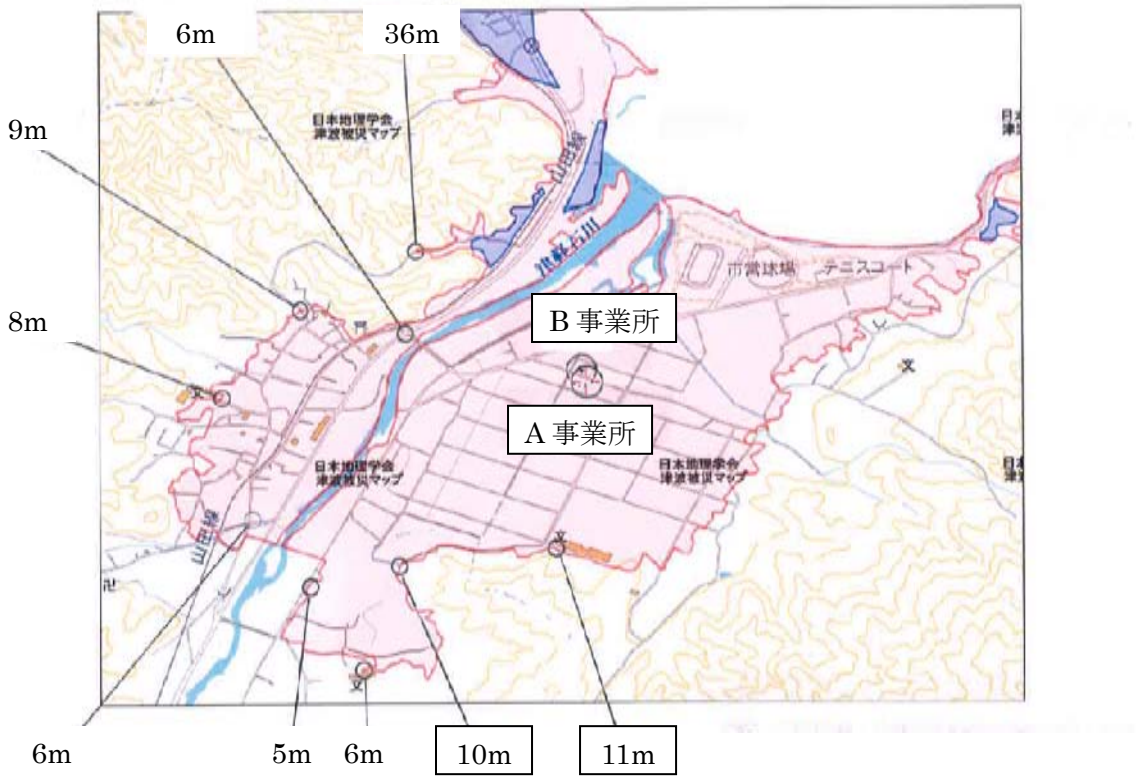
図 4.1.4-17　平底円筒形貯槽の全景

図 4.1.4-18　洗掘の痕跡

＜参考資料＞

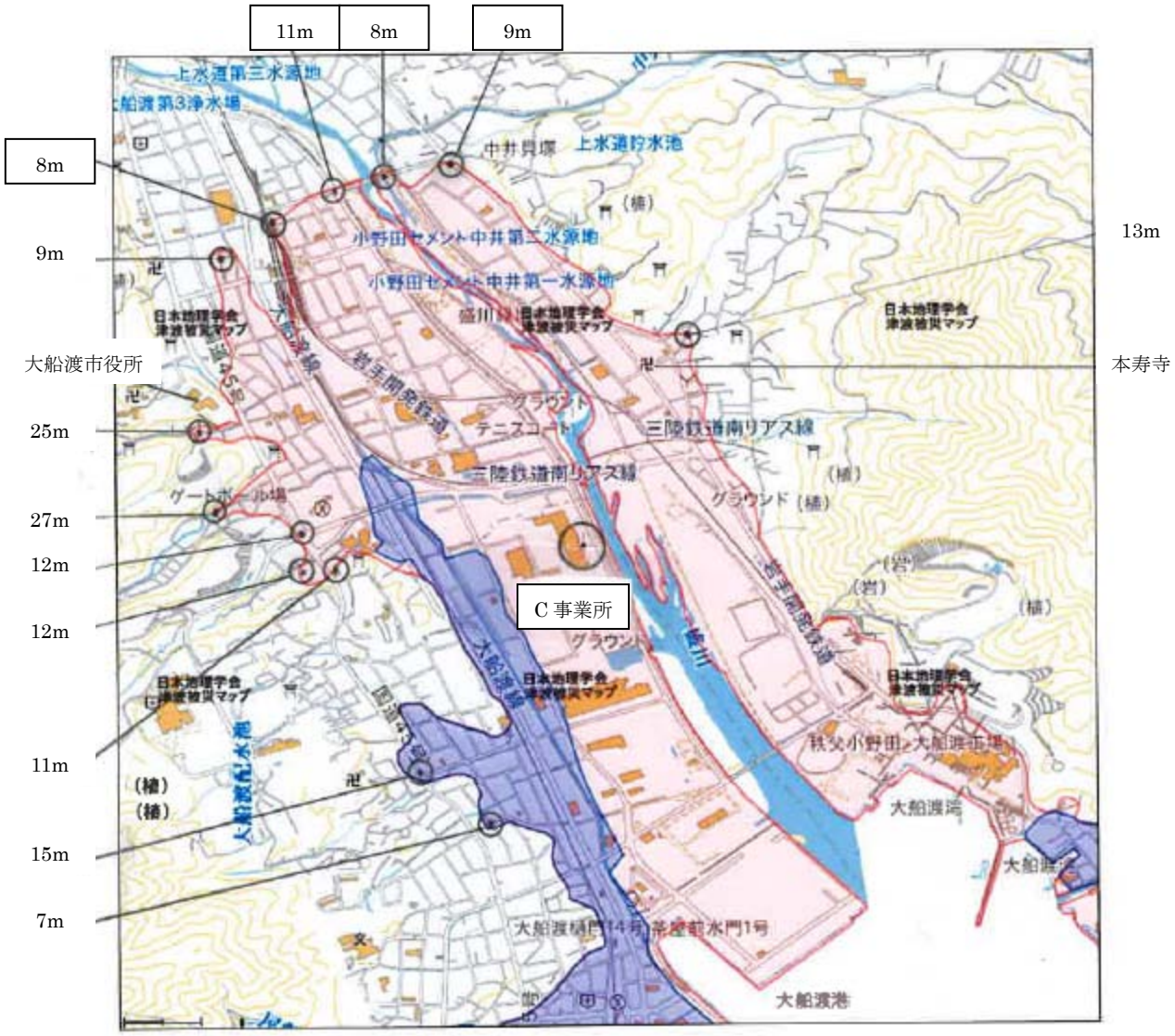
各地区の遡上高

（１）宮古・Ａ事業所、Ｂ事業所



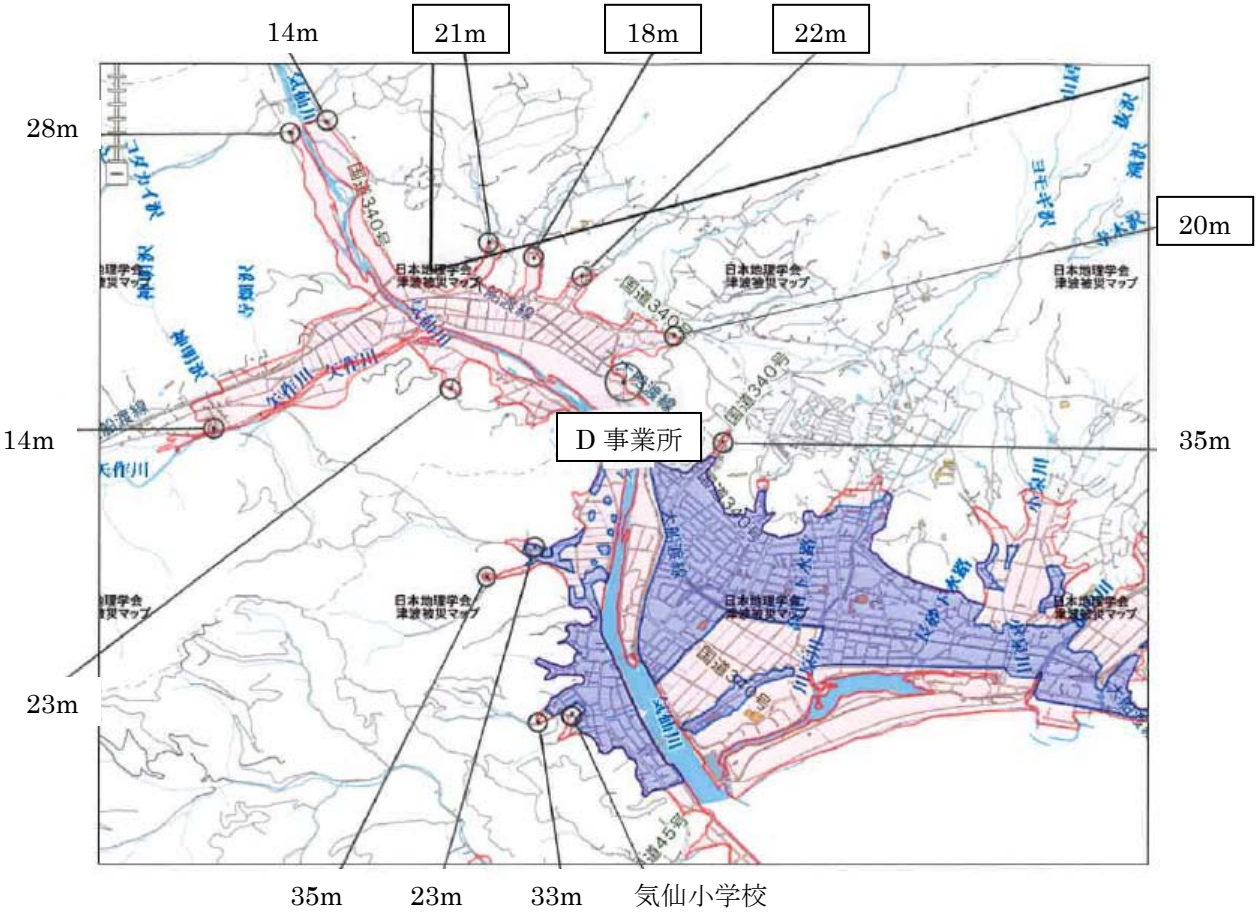
図の出典：日本地理学会・津波被災マップ

（２）大船渡・C 事業所



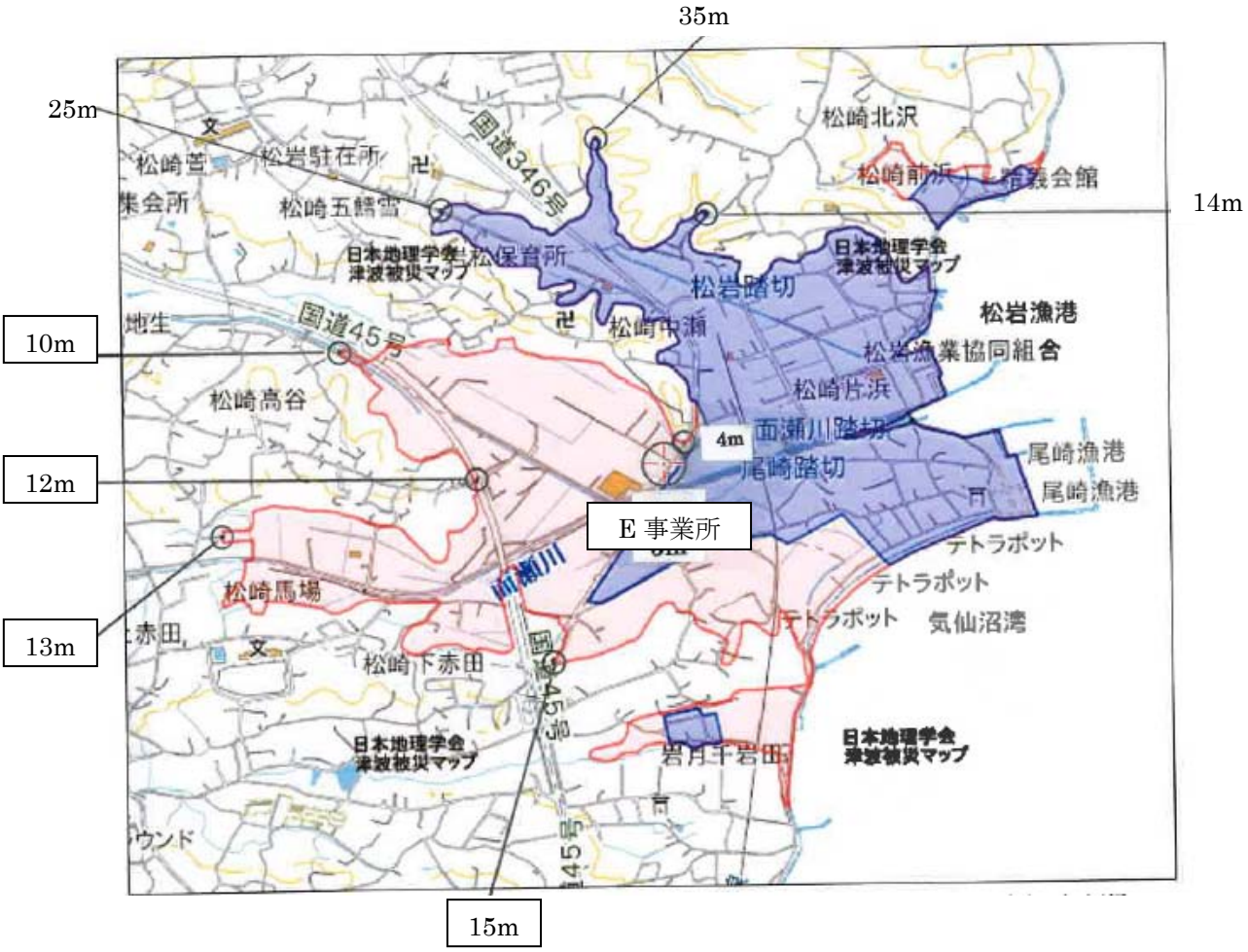
図の出典：日本地理学会・津波被災マップ

（３）陸前高田・D 事業所



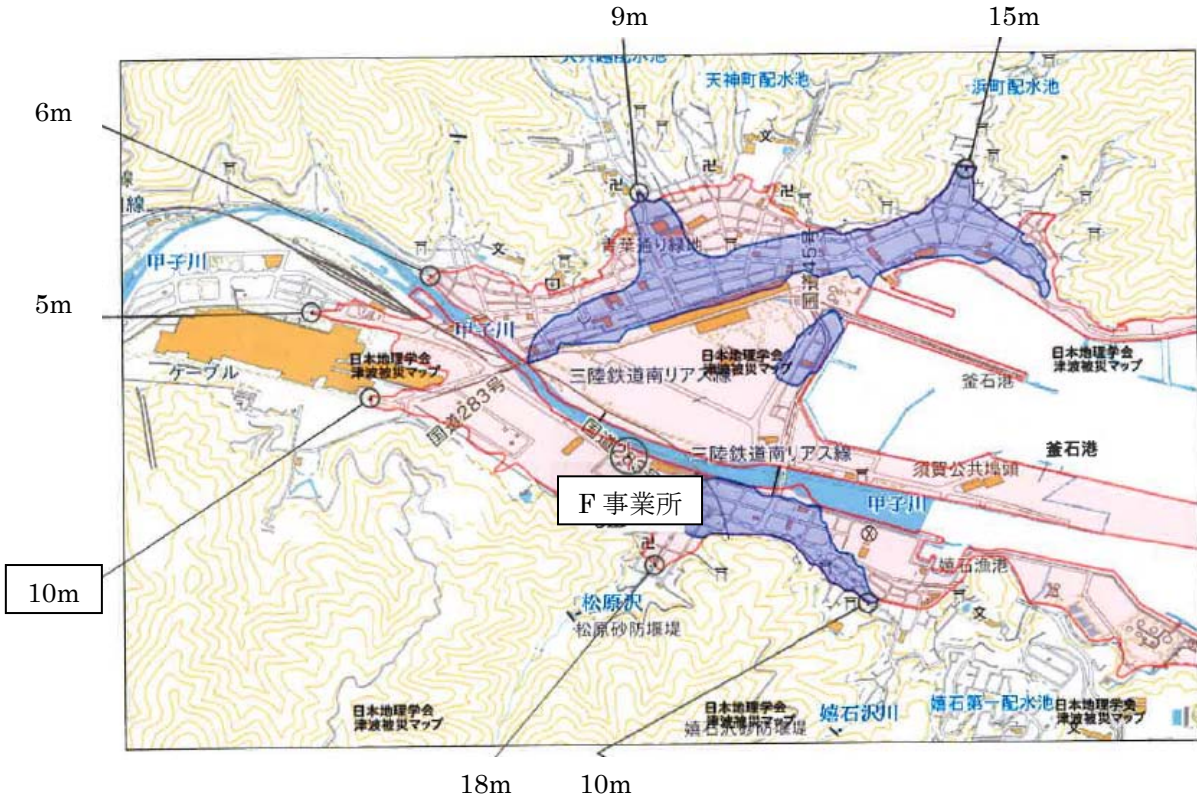
図の出典：日本地理学会・津波被災マップ

（４）気仙沼・E 事業所



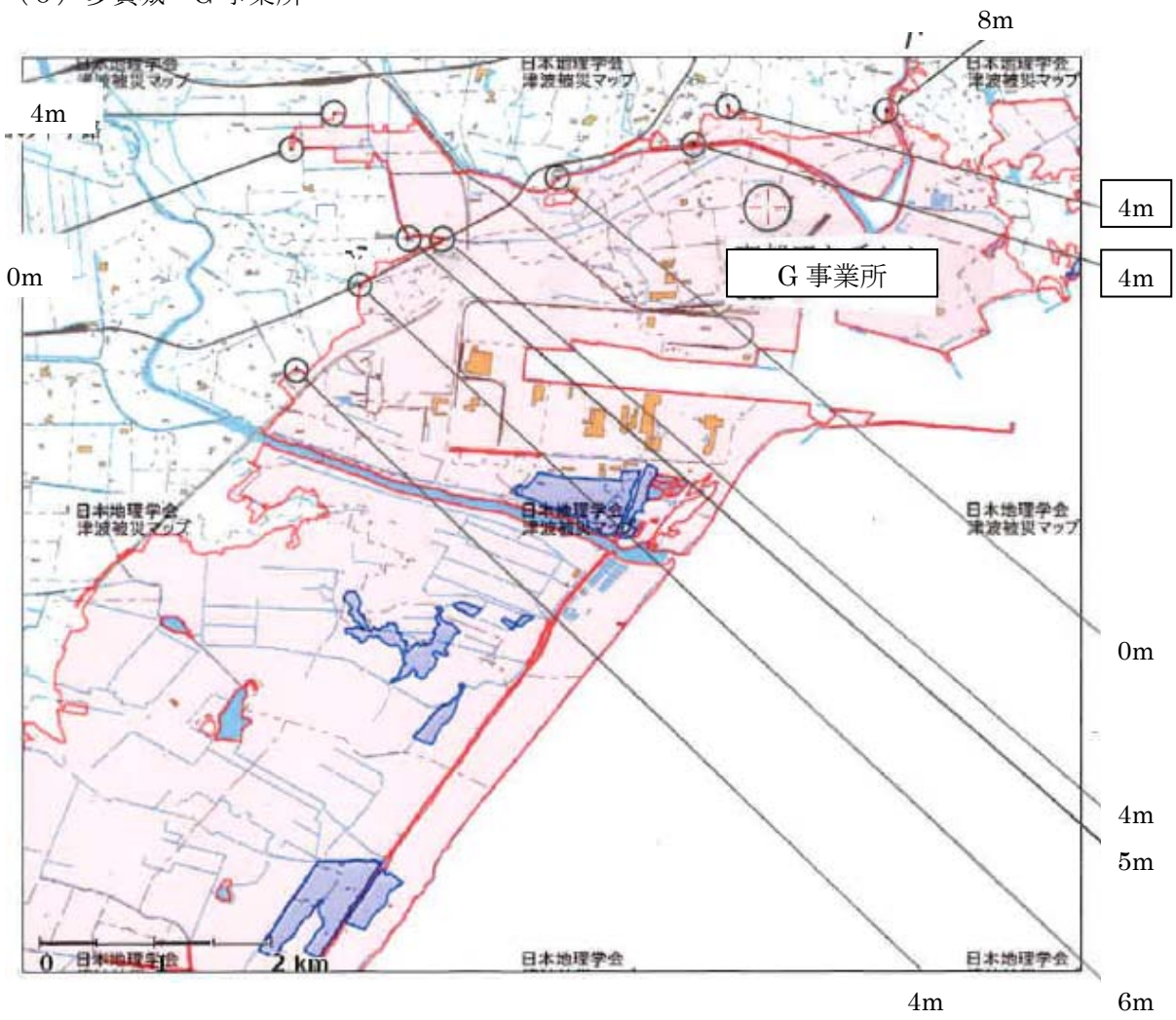
図の出典：日本地理学会・津波被災マップ

（５）釜石・F 事業所



図の出典：日本地理学会・津波被災マップ

（６）多賀城・G 事業所



図の出典：日本地理学会・津波被災マップ

４．２　高圧ガス設備の種類と優先順位について

高圧ガス設備の津波の影響の評価方法を検討するにあたり、「東日本大震災を踏まえた高圧施設等の地震・津波対策について」の中で次のように指摘されている。「高圧ガス設備は形状、種類が多種多様であり、全ての設備を一定の手法で評価することは困難であることから、貯槽本体、貯槽と緊急遮断弁との間の配管等、破損、流出による周辺地域に与える影響が大きいと考えられる設備について優先的に検討を行う。」

以上のことから、多種にわたる高圧ガス設備のうち危険度（重要度）が高いと考えられる設備の検討を行う必要がある。

4.2.1　耐震設計構造物の重要度分類

耐震設計構造物の重要度分類は、各塔槽類ごとの貯蔵能力又は配管の運転状態における内容物の質量及びガスの種類に応じて、当該塔槽類又は配管の外面から当該耐震構造物が設置される事業所の境界線までの最短の距離との関係から)から定まる重要度を決定する。

重要度Ⅰａ：その損傷若しくは機能喪失が、事業所外の広範囲の公衆、公共財産、環境に壊滅的損害を与えるおそれのあるもの。
重要度Ⅰ　：その損傷若しくは機能喪失が、事業所外の公衆、公共財産、環境に多少の損害を与えるおそれのあるもの。
重要度Ⅱ　:その損傷若しくは機能喪失が、事業所内の人命を損なうおそれのあるもの。
重要度Ⅲ　：その他、通常の耐震性を要するもの。

耐震設計構造物の重要度分類の一例を以下に示す。

表 4.2.1　ガスの分類

番号	分類名	内容
(1)	第1種毒性ガス	塩素、シアン化水素、二酸化窒素、フッ素、ホスゲン
(2)	第2種毒性ガス	塩化水素、三フッ素化ホウ素、二酸化硫黄、フッ化水素、ブロムエチレン、硫化水素
(3)	第3種毒性ガス	第1種および第2種毒性ガス以外の毒性ガス
(4)	可燃性ガス	(冷凍保安規則第2条第1号に規定する可燃性ガス) アンモニア、イソブタン、エタン、エチレン、クロルメチル、水素、ノルマルブタン、プロパン、プロピレン (一般高圧ガス保安規則第2条第1号及びコンビナート等第2条第1号に規定する可燃性ガス) アクリロニトリル、アクロレイン、アセチレン、アセトアルデヒド、アルシン、アンモニア、一酸化炭素、エタン、エチルアミン、エチルベンゼン、エチレン、塩化エチル、塩化ビニル、クロルメチル、酸化エチレン、酸化プロピレン、シアン化水素、シクロプロパン、ジシラン、ジボラン、ジメチルアミン、水素、セレン化水素、トリメチルアミン、二硫化炭素、ブタジエン、ブタン、ブチレン、プロパン、プロピレン、ブロムメチル、ベンゼン、ホスフィン、メタン、モノゲルマン、モノシラン、モノメチルアミン、メチルエーテル、硫化水素及びその他のガスであって次のイ又はロに該当するもの イ　爆発限界の下限が十パーセント以下のもの ロ　爆発限界の上限と下限の差が二十パーセント以上のもの 液化石油ガス保安規則第1条および液化石油ガスの保安の確保及び取引の適正化に関する法律に規定する液化石油ガス(プロパン、ブタンその他政令で定める炭化水素を主成分とするガスを液化したもの)
(5)	その他のガス	上記(1)、(2)、(3)、(4)以外のガス

表 4.2.2　重要度分類（一般）

ガスの種類	貯蔵能力 W(t) / 距離 X(m)	5未満	5以上 20未満	20以上 100未満	100以上 500未満	500以上
第１種毒性ガス	100未満	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	100以上　200未満	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	200以上　500未満	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	500以上1,000未満	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
	1,000以上	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
第２種毒性ガス	50未満	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	50以上　200未満	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	200以上　500未満	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	500以上1,000未満	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
	1,000以上	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ

ガスの種類	貯蔵能力 W(t) / 距離 X(m)	10未満	10以上 100未満	1００以上 1,000未満	1,000以上 10,000未満	10,000以上
第３種毒性ガス及び可燃性ガス	20未満	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	20以上　40未満	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	40以上　90未満	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	90以上200未満	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
	200以上400未満	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
	400以上900未満	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
	900以上2,000未満	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ
	2,000以上	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
その他のガスは貯蔵能力、距離に関係なく常に重要度はⅢとする。						

（重要度Ｉａは特定製造事業所等における条件に該当するときＩがＩａとなる）

高圧ガス設備の耐震設計による重要度（危険度）の考え方では、

①ガスの種類（毒性、可燃性、その他）

②ガスの量（多量、少量）

③距離（位置）（遠い、近い）

の３つの項目を考慮に入れて検討されている。

4.2.2 高圧ガス設備の種類と優先順位

高圧ガス施設を構成する高圧ガス設備の種類は以下のものが挙げられる

- 貯槽類
- 塔類
- 反応器
- 熱交換器
- 蒸発器
- 凝縮器
- 加熱炉
- 配管

これらの設備の中で、津波による破損や流出により周辺地域に著しい影響を起こす可能性の高い設備は、多量の高圧ガスを貯蔵している貯槽類であると考えられる。なお、塔類の設備であっても多量の高圧ガスを貯蔵可能であるものはそれに該当する。

また、配管の中でも貯槽の元弁から緊急遮断弁までの配管は高圧ガスを封じ込めるための重要な部分であるため、貯槽類に含めて考えるべきである。

◆危険物タンクの被災モード

「津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案」（藤井他）においては、屋外タンク（ここでは原油等の液体タンクを想定している）の被害や津波漂流物による被害を評価するためには、津波外力による屋外タンクの被災モード、津波漂流物による構造物等の被災シナリオを把握することが重要であること、さらに、その被災シナリオについて実務への適用を目指した検討を実施し、屋外タンクの被害想定手順が提案されている。

液体タンク（危険物タンク）と高圧ガス設備の違いは以下のものが考えられる。

- 原油等の液体タンクに使用されているタンクの形状は平底円筒形といわれるものであり、容量の違いはあるものの形状は統一している。これに対し、高圧ガス設備には貯槽の形状や支持方法などで多数の種類があり各々の形状は異なる。
- 高圧ガス設備は耐圧強度を必要とするため、貯槽本体の剛性が高い。

高圧ガス設備については種類に応じた各破損モード（貯槽本体、支持架台、配管類等）について、検討を行う必要がある。

4.2.3 貯槽の種類

①球形貯槽

球形貯槽の容量は直径２～５ｍ（数㎥）のものから直径２０ｍ以上（数千㎥）のものがある。

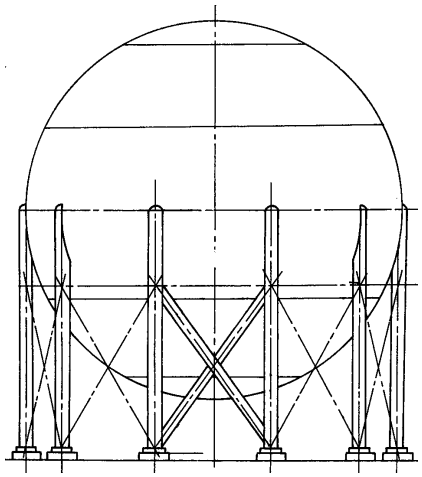


図 4.2.3.1

②横置円筒形貯槽

支持部は通常２点支持であり、コンクリートの支持脚（ペデスタル）で支持されている。

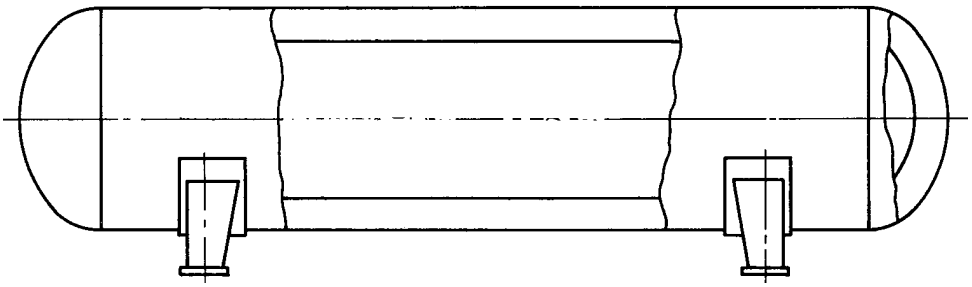


図 4.2.3.2

容量は、以下のものあり。

ＬＰＧ充てん所、小規模事業所：２０～５０㎥

大規模事業所　　：１００㎥～

ＬＰＧ受入基地等の大型　　：１０００㎥ 超

③たて置円筒形貯槽

大型から小型のものまであり、設置数も多い。また、充てんされるガスの種類も多い。

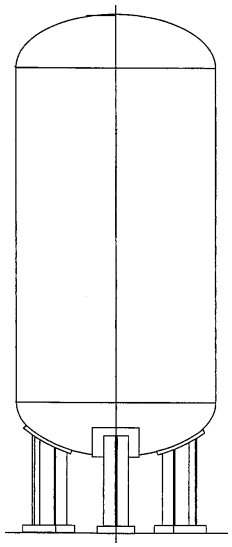


図 4.2.3.3

④平底円筒形貯槽

大規模な貯槽設備として使用されるが、設置されている数は少ない。高圧ガス用は危険物用と違って、鉄筋コンクリート及び杭によって造られた基礎に固定されている。また、設置形態として地上形の他に地下形、半地下形などがある。

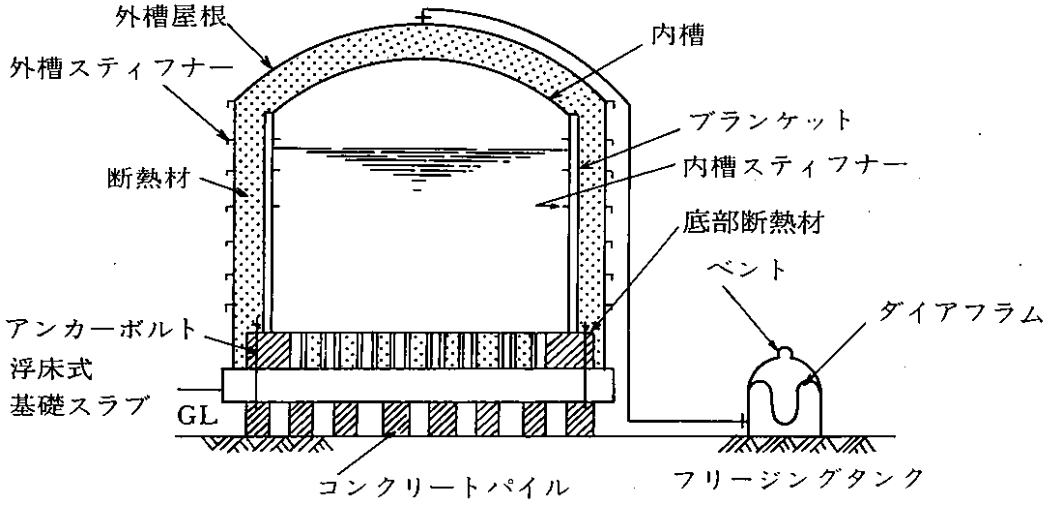


図 4.2.3.4　平底円筒形（二重殻式）貯槽

4.2.4 検討の進め方

貯槽類の各種類から検討の順位を検討する場合、以下の項目を考慮する。

表 4.2.4

高圧ガス設備の種類	容量	主なガスの種別（可燃性、毒性、その他）	設備の数	東日本大震災での津波被災事例	優先順位
球形貯槽	大きい	可燃性、毒性	多い	なし	②
横置円筒形貯槽	小さい～大きい	可燃性、毒性、その他	多い	あり	①
たて置円筒形貯槽及び塔	小さい～大きい	可燃性、毒性、その他	多い	あり	③
平底円筒形貯槽	非常に大きい	可燃性	少ない	なし	④

これらの貯槽類の中から、津波による破損や流出により周辺地域に著しい影響を起こす可能性の高い貯槽についての評価手法検討の着手の順位付けとして考えられるのは、多量のガスを貯蔵している貯槽類の中で、小規模事業所から大規模な施設まで幅広く設置されており、設置数も多い横置円筒形貯槽の重要度が高いと考えられる。以下、球形貯槽、たて置円筒形貯槽及び塔、平底円筒形貯槽、の順位と考えられる。

また、貯槽の元弁から緊急遮断弁までの配管については緊急時に高圧ガスを封じ込めるための重要な部分なので着手順位は高いと考えられる。

５．まとめ

５．１　構造物、建築物等に関する津波に関する津波の影響の評価方法

5.1.1　文献収集調査

①津波被害対策の方向を示す官公庁の報告書

- 東北大震災による津波被害を被った経験より、「津波防災地域づくりに関する法律」が制定された。これには、都道府県は、津波があった場合に想定される水深の区域および水深を設定しなければならないことが定められている(津波水深想定)。
- 「防災基本計画」(中央防災会議)においては、津波対策は、最大クラスの津波に比べて発生頻度が高く津波高さは低いものの大きな被害をもたらす津波（津波Ａ)、と発生頻度は極めて低いものの発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波（津波Ｂ）の二つの場合に分けて検討することとしている。
- 津波浸水想定図をインターネット上で検索してみたところ、いくつかの県で津波浸水想定を公表していた。ただし、必ずしも「最大クラスの津波」と「発生頻度の高い津波」の二つが把握できるものとはなっていなかった。また、その上限値を「～ｍ以上」と記述されているものがあり、上限値を判断できないものもあった。
- 「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書」(総務省）では、平底円筒形貯槽の被害事例が調べられており、その被害の主たるものは、タンクの浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧差による側板座屈、であるとしている。そして、津波被害予測を試みた結果を報告し、さらなる検討と被害実例との照合が必要と記述されている。

②津波被害に関する報告書

- 東日本大震災による津波の最大浸水深は、収集資料「東北日本大震災による津波浸水域における学術調査報告書」(東北大学他)、「2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」(港湾空港技術研究所)、「東日本大震災による県内高圧ガス施設被害について」(宮城県)から、おおよそ 10m と考えられる。また、津波が陸に到着したときの速度は 10～30km/時と考えられる。
- 「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報) 6.津波による建築物の被害」(建築研究所）は、津波力の評価式として、以下を紹介していた。
  ① 津波避難ビル等に係るガイドライン(内閣府)
  ② Guideline for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis(FEMA-P646)
  ③ Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE 7-05,2006 年)
- 海外においては、2004 年スマトラ地震によるインドネシア・アチェ州の津波被害があった。この津波は、アチェ州西海岸で津波高さ 20m を越し、北海岸で 10m 程度、遡上は内陸部に 3km 程度と考えられている。

③他の分野での津波影響評価に関わる文献

- 建築分野での波力の計算方法として、(1)FEMA-P646、(2)津波避難ビル等に係るガイドライン（内閣府）を把握した。(1)は静水圧と流体力を別々に扱うものであり、(2)は設計浸水深の 3 倍に対する静水圧で全体の津波力を経験的に評価するものである。

- 国内において橋梁の橋桁に作用する津波力は流体力で検討されている(「橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算」(鴫原他、土木学会))。これは、津波水は橋梁のまわりを常に流れ、これに働く力は橋梁前後の水深差からのものよりも周りの流速差から生じるものの方が主体であることからときていると考えられる。なお、道路分野の橋桁に作用する津波力について「津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究」(新道路技術会議)ではFEMA-P646の流体式と同じ考え方の抗力式を用いている。
- 上記の式はいずれも津波浸水深を入力として必要であるが、これをどのように得るかは具体的には記述されていなかった。

④高圧ガス施設の津波影響評価の全体構想を考えるに参考となる文献

- 「津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案」(藤井他)は、平底円筒形貯槽の検討から、津波被害として、(a) タンクの浮き上がり,(b) 滑動,(c) 転倒,(d) 座屈,(e) 傾斜,(f) 配管の破損,(g) 構造物周辺の洗掘,(h) 漂流物の衝突,(i) 防液堤の破壊、を考えることを提案している。
- 「高圧ガス設備耐震対策推進委員会報告書」(高圧ガス保安協会) は、平底円筒形貯槽の対津波安全性チェックの計算例を、座屈強度とアンカーボルト強度に対して示している。

⑤高圧ガス施設の津波影響評価の各要素を考えるに参考となる文献

- 津波浸水想定はコンピュータ・シュミレーションで行なわれ、基礎となる方程式は浅水方程式といわれるものである。 (「津波浸水想定の設定の手引き」(国土交通省))
- 「津波遡上時の燃料タンクの健全性評価」(中部電力) において平底円筒形貯槽の座屈強度実験の国内報告が見られた。
- 流木衝突力の評価式の検討、の国内報告が見られた。これは FEMA-P646 のものに比べ複雑なものである。 (「流木衝突力の実用的な評価式と変化特性」(松富、土木学会))
- 建物に残っている津波痕跡高から津波速度を求める国内研究報告があった。 (「Inundation flow velocity of tsunami on land and its practical use」(H. Matsutomi 他))
- 津波に漂流したコンテナによる衝突力の評価式の国内研究報告があった。 (「津波による漂流物の港湾構造物影響調査」(国土交通省中部地方整備局))
- 津波数値シミュレーションから津波波力を求める国内研究報告があった。 (「実務的手法による津波波力の評価 －直立構造物に作用する波力の数値計算－」(鴫原他、土木学会))
- 橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算の国内報告があった。 (「橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算」(鴫原他、土木学会))

5.1.2 津波・被災貯槽のヒアリング調査

東日本大震災において津波に被災した高圧ガス設備について調査を行った。

- 津波により流出した液化石油ガス貯槽は５基とも横置円筒形貯槽であり、その設置年は昭和４１～５８年、貯蔵能力（プロパン換算）は１５～３０トン、貯蔵ガスはプロ

パン４基及びブタン１基であった。貯槽の設置場所は海岸からの距離が約 0.5～1.5km、地震震度が５弱～６強、浸水深が約 5～10m 以上であり、貯槽は非常に大きな津波の流体力、衝撃力等を受けたと考えられる。また、貯槽によっては設置場所が河川敷又はその付近であったため河川を遡上する津波の影響を大きく受けたと考えられる。

- 今回調査した津波に被災したが流出をしなかった液化石油ガス貯槽４基は、横置円筒形貯槽３基及びたて置円筒形貯槽１基で設置年は昭和４１～５４年、貯蔵能力（プロパン換算）は１５～２０トン、貯蔵ガスはプロパン３基及びオートガス（ブタン(80%)＋プロパン(20%)）１基であった。貯槽の設置場所は海岸からの距離が約 0.6～1km、地震震度が６強～７、浸水深が約 2～3m であった。浸水深が 2～3m における事業所の高圧ガス設備には大きな破損、流出等は発生していなかった。
- 流出した貯槽は設置されてから時間が経っているもの（30～40 年以上）が多いため、基礎ボルト・ナットの数が４本のものが多かったが、８本で固定されているものも流出したことが確認された。このことから、貯槽の流出の要因として考えられることは、使用しているボルトの本数の他に、それを固定している基礎の基礎ボルト部の構造及び貯槽のサドル部の固定方法並びに貯槽の立地（津波の流れ方向、地形等）も影響していると考えられる。

５．２　優先的に評価手法を策定すべき設備の検討

高圧ガス設備の中で、津波による破損や流出により周辺地域に著しい影響を起こす可能性の高い設備は、多量の高圧ガスを貯蔵している貯槽類であると考えられる。なお、塔類の設備であっても多量の高圧ガスを貯蔵可能であるものはそれに該当する。

また、配管の中でも貯槽の元弁から緊急遮断弁までの配管は高圧ガスを封じ込めるための重要な部分であるため、貯槽類に含めて考えるべきである。

《高圧ガス設備の種類》

- 貯槽類
- 塔類
- 反応器
- 熱交換器
- 蒸発器
- 凝縮器
- 加熱炉
- 配管

５．３　優先的に評価手法の開発を行うべき施設の選定

優先的に評価手法の開発を行うべき施設として貯槽類が挙げられた。更に、貯槽類の中から、津波による破損や流出により周辺地域に著しい影響を起こす可能性の高い貯槽についての評価手法検討の着手の順位付けとして考えられるのは、多量のガスを貯蔵している貯槽類の中で、小規模事業所から大規模な施設まで幅広く設置されており、設置数も多く、東日本大震災において津波被災例が多く見受けられる横置円筒形貯槽の重要度が高いと考えられる。以下、球形貯槽、たて置円筒形貯槽及び塔、平底円筒形貯槽、の順位と考えら

れる。

また、貯槽の元弁から緊急遮断弁までの配管については緊急時に高圧ガスを封じ込めるための重要な部分なので着手順位は高いと考えられる。

５．４　今後の展開

- 本年度は FEMA-P646 ガイドラインを参考にして、高圧ガス設備の一種である横置円筒型貯槽に津波襲来時に作用する荷重を試算した。試算例を基に検討を行ったが、当ガイドラインは避難ビルを想定したものであるため、今回算出された数値については、多種の形状が存在する高圧ガス設備にそのまま適用可能というわけでなく、今後実験やシミュレーションなどの検証を行い、各高圧ガス設備を対象として適切な評価方法について検討をすすめる必要がある。今後の主な課題として、以下のものが考えられる。
  - 評価対象とする津波の大きさ想定
  - 各地域の津波浸水想定の把握
  - 最大浸水深・最大流速に関して、今回は FEMA-P646 とダムブレーク解析解値を比較し、FEMA 簡易式の妥当性を検証した。更に詳細な検証を行うには、津波シミュレーション解と FEMA の最大浸水深・最大流速の簡易計算式値を比較し、その妥当性を検証するなどの必要がある。
  - FEMA の簡易計算式値における遡上高の決定方法
  - 横置円筒型貯槽の他の貯槽タイプに対する安全性評価において、どの箇所の破壊を想定するか、そこにどのような力がかかることを想定するかの明確化。
  - 漂流物の想定及びそれによる衝撃力の計算方法。
- 津波来襲時の構造物への影響評価については、建築業界等でも検討がすすめられていることから、それらに関する新たな情報についても必要に応じて収集する。
- 被災した事業所のヒアリング調査結果から、津波による洗掘が直接的に高圧ガス設備を破損させたことは無かったようだが、高圧ガス施設内で起きていたことがわかった。津波影響評価を行うことと同時に洗掘に対応した設備レイアウトの可能性についても検討する必要がある。また、高圧ガス設備の基礎部の適切な施工方法に関しても考慮する必要がある。
- 高圧ガス設備に関連する施設（防液堤、計器室、避難棟など）についても、津波来襲を想定して、その機能を維持できるための対処を検討する。

Guideline for design of Structures for vertical Evacuation from Tsunamis
FEMA P646/June 2008 の概略

備考）

(1)FEMA(Federal Emergency Management Agency, 和名：連邦緊急事態管理庁)は 2012 年 10 月 03 日現在、United States Department of Homeland Security(アメリカ国土安全保障省)の下にある。

(2)Undersea slump は“海底地すべり”と訳す

(3) SEI: Structural Engineering Institute

１　はじめに

１．１　目的と範囲

高所が存在しない地域や局所的津波が発生する地域では、水平方向に逃げるための十分な時間をもつことができない。このようなところでは、津波避難施設により上方に避難するのが現実的解決策となる。

本書は津波避難施設の建設・運営を考えている技術者、建築家、地方・国家公務員、建築関連当局者、コミュニティ・プランナー、施設所有者に、津波避難施設に関する情報を提供することを目的としている。本書の利用は、津波被害が想定される米国内を想定しているが、他の同様な地域で利用されることを妨げない。

１．２　避難ビルの建設をきめるには

避難ビルをつくるかどうかを決めるファクターはいろいろあるが､そのうちの幾つかは、地域の生計手段、津波により予想される被害(損失、負傷、死亡など)、災害時緊急対応計画、避難設備の平常時および非常時の使い方、建設費用、である。

１．２．１　　ハザードとリスク

ハザードは津波にあうかどうかを考えることで、リスクは津波によりおきる被害を考えることである。

１．２．２　　設計と施工決定

最初に、被害を及ぼす津波の大きさを数値で定め、それに対して、損害、機能喪失、負傷、死亡等の被害を評価して、避難ビルをつくるかどうか決める。

１．３　本書の限界

本書は他の建築基準などに取って代わるものではなく、それを補完するものである。

大規模な津波は非常にまれであり､存在する津波知識は限られた過去情報に基づいている。津波避難施設を設計津波に耐えられるものにするということは、すべての考えられる津波に耐えられるということを意味しない。設計津波の選択は、地域の津波遭遇度、コミュニティが我慢できる限界、経済的な観点から行なわれる。

１．４　本書の構成

本書は、場所の選定、構造物の挙動、設計荷重、設計の考え方、緊急事態時のマネージメントに関して、ガイダンスを提供する。

２　背景情報

２．１　一般事項

津波はほとんどの場合海底地震により起きるが、火山活動、地すべり、海底地すべり、地球外でのできごと、でも起きる。水深が深い海では波の海面における傾斜はなめらかで感知することができない。しかし、波が海岸の浅い海に近づいたとき、波の速度は遅くな

り、波高が高くなる。波が海岸に到達したとき、波は被害を及ぼす高さと強さをもち、陸域を通過して、構造物を壊し、陸上を浸水する。

遠方で発生した津波は２時間またはそれ以上の時間をかけて到達するが、近郊で発生した津波は３０分以内に到達する。中距離で発生する津波もあり、これは３０分から２時間で到達する。

２．１．１　　過去の津波

２００４年１２月２６日に起きたインド洋津波は、マグニチュード９．３の海底地震で発生し、北インド洋周辺の海岸域を打ち壊した。この津波は１５分から７時間かけて被災地に到着し、２２万人の命を奪い、１５０万人の人を移動(被災)させた。
発生源が遠方の場合、コミュニティに警戒を呼びかけることができるが、近郊の場合それができない。

１９９３年に北海道奥尻を襲った津波は地震発生後５分以内で到達し、２０２人の人が、地震による土砂に捕らえられたことと、津波から非難できなかったことにより、２０２人の人が死亡した。

津波はまれにしか起きないと見なされているが、津波は世界中で定期的に起きている。平均して年に２０回程度の津波を発生させる地震が起きており、そのうち５回は、被害や死亡者を出すに十分な大きさを持っている。

１９９０年から１９９９年の間で８２回の津波が報告され、そのうち１０回は４０００人以上の死亡者を出している。海岸域で住民が増加する傾向にあるので、さらに多くの人が津波の危険にさらされていくであろう。

表２にＮＯＡＡが過去２００年の津波データから作成した米国内の津波の来襲危険度を示す。

表２－１　米国における量的津波危険性アセスメント(Dunbar その他,2008)

地域	記録的津波遡上	危険な定期的津波遡上
大西洋岸	とても低い、または低い	とても低い
メキシコ湾岸	ない、またはとても低い	ない、またはとても低い
カリブ海沿岸	高い	高い
西海岸	高い	高い
アラスカ	とても高い、または厳しい	とても高い
ハワイ	とても高い、または厳しい	とても高い
西太平洋の島々	ある程度	高い

２．１．２　　津波の挙動と特長

津波の挙動と特徴は他の海岸域災害とは大きくことなる。これは津波のユニークな時間スケールに起因する。代表的な風波の周期は５秒から２０秒であるが、津波の周期は数分から１時間程度である。表 2－2 にいろいろな海岸域災害との比較を示す。

表 2-2 いろいろな海岸域災害との比較

災害現象	継続時間	波の高さ	代表的な警戒時間
風波	数 10 秒	1～2m	数日
津波	数 10 分から 1 時間	1～10m	数分から数時間
ハリケーン	数時間	1～10m	数時間から数日
地震	数秒	予測不可能	数秒から一瞬

津波の挙動予測は津波波形、周辺地形、海の水深に大きく依存し、かならず不確かさを持っている。例外もあるが、通常津波は次の特徴をもっている。

津波の原因となった現象が、津波の周期、強さ、被害をもたらす度合い、を決める。

津波はエネルギーを失うことなく、数 1000km を伝播する。

津波は特定の方向に強く伝播する。そして、より細長い津波発生源は、より強い指向性をもつ津波を作る。

津波は短いものから長いものまでの、多くの波長成分を持っている。そして長い波長成分は短い波長成分より速く伝播する。そのため大洋を渡る津波はしばしば長周期波で特徴づけられる。短い波長成分は取り残され、四方に散って弱くなる。

沿岸近郊で発生した津波はしばしば、第１波は引き波で、次に押し波がくる。遠方津波では、しばしば第１波は押し波である。

津波は海岸で大きく屈折し､エネルギーを消失することなくその動きを数時間持続する。一般に複数の津波が海岸域を襲い、第一波はそれほど大きいものではない。

津波遡上高は、明らかに周辺の地域ごとに異なる。

目撃者の証言やビデオ記録から、津波が海岸に近づいたとき津波は高い波となり、その波は壊れ、乱れることがわかっている。

津波の波が海岸に達したとき､その達したときに大きな波が形成され､陸上を遡上する。遠方からきた波長の長い津波が急峻な地形を遡上するときは、その高まりは穏やかで、波の先端では、海水がくずれ落ちる。

２．２　津波のビルへの影響

2004 年のインド洋津波と 2005 年のハリーケーン・カタリーナから建物に及ぼす津波の影響がわかっている。建物に及ぼす津波被害は、次のカテゴリーにより分類される。

(1)津波の静水圧、流体力からくるダメージ、(2)浮流物の衝突力、(3)浮遊物と可燃性液体による火が広がること、(4)洗掘と斜面・基礎の崩壊、(5)波の動きにより発生した風

２．２．１　　津波の影響に関する過去のデータ

木造建築物はあきらかに多くの被害にあい、強化コンクリート建築物はわずかな被害を受けるにすぎない、とうことがインド洋津波から言える。ただし、１９４６年アリューシャン津波はコンクリート製の灯台を壊滅した。１９９３年の奥尻津波は青苗地域の木造建築物を壊滅した。１９９２年ニカラグア津波は地上に立てられた木造住宅は崩壊したが、高床にした木造建築物は生き残った。

漂流物がある速度で建築物に衝突して、建築物が崩壊した例がある。１９９３年奥尻津波において、漂流した漁船が建築物に被害を与えた。津波により多くの建物が壊れたという報告がある一方、多くの建物が生き延びたという報告もある。奥尻津波ではふたつの強化コンクリート製２階建て建築物が３ｍ以上の津波に対して生き残っている。

２．２．２　　インド洋津波

石造り建築物の基礎が洗掘された被害が報告されている。また、コンクリートパネルの浮力による被害が報告されている。

２．２．３　　ハリーケーン・カタリーナ

嵐の間の波高さは 25～28 フィート(7.5～8.4)であったと想定されている。そして、アラバマ州モービルからルイジアナ州ニューオリンズにかけて大きな浸水を引き起こした。ハリケーンも津波も海岸域に洪水をもたらすが、その特徴はまったくことなる。ハリケーンは海岸域を長時間（数時間）浸水させ、波は繰り返し打ち寄せる。一方、津波浸水は短時間(数十分)で、急激に水深を変え、ものを掃き去る流れである。

２．２．４　　耐津波設計に対してのヒント

建築物が津波に対して生き残れるかどうかは、建築物の構造タイプと津波遡上高により異なる。過去の観測結果から、多くの建築物が津波により壊れるものの、適切に設計された建築物は生き残れることができる、ということができる。インド洋津波とハリーケーン・カタリーナから対津波設計に対する以下のヒントが得られた。

上方避難施設は強化コンクリート構造か鋼構造であるべきである。

近郊地震に対する津波非難施設は地震荷重にも耐えられる設計を行なわなければならない。

上方避難施設は波が壊れる地点から離れたところに設置されるべきである。

浮遊物の衝撃力、浮遊物を堰き止めるときの力は、明らかに存在するので、これらを考慮しなければならない。

建築物内部に空気が閉じ込められたときなどに起こる浮力を考慮しなければならない。基礎まわりの洗掘を考慮しなければならない。

浮遊物の挙動の不確かさとその衝撃力は大きいとの事実から、意図的な崩壊という概念を取り入れるべきである。

３　津波災害アセスメント

津波氾濫のモデル化は津波被害予測のキーとなる要素である。この技術は開発段階にあるが、ここでは現在利用できるツールを紹介する。

３．１　現在利用できる津波モデルと氾濫地図

津波氾濫モデルには、ＮＯＡＡ津波モデルとＵＳ津波災害緩和プログラムがある。前者は津波を予測するものであり、後者は津波氾濫地図を作成するものである。両方とも数値モデル化技術に依存している。

３．２　ＮＯＡＡ津波プログラム：予測モデルと地図表示

このシステムはv.v.Titovが開発した数値解析プログラムを用いている。そして、これはMOSTモデル(Method of splitting Tsunami)として知られている。

３．３　ＵＳ津波災害緩和プログラム：信用度の高い最悪ケースのシナリオ

出力は最大浸水深と最大流れ速度

３．４　ＦＥＭＡ地図表示最新化プログラム：確率的津波災害アセスメント

100年確率津波、500年確率津波より作成した津波氾濫災害マップ。

３．５　利用できるモデル化および地図表示品の限界

利用できる氾濫情報は限られており、現在開発の努力が進められている。

３．６　津波避難ビル設計における津波の定量化

どのような大きさの津波を設計に用いるか明確な基準はないが、2500年に一度起こる大きな津波を設計津波に採用することがよいであろう。

３．７　津波災害アセスメントの改良の提案

対象としている場所での津波モデル作ることが重要である。それは難しい作業であるが、可能であり、耐津波設計に必要である。

４　上方向避難オープション

避難施設は津波浸水高に対して十分な高さを持つ建物、または地上の盛上りである。避難施設は、単独施設または大きな施設の一部、避難施設としてだけ用いるものと常時他の目的に用いるものもちるもの、津波だけに対応する施設と他の災害にも対応する施設、などいろいろなオープションがある。

概念的には、新規作成と既存施設の改修の両方が考えられるが、既存施設の改修はむずかしい仕事となるであろう。

４．１　上方向避難施設について

どのオープションを選ぶかは、緊急事態対応計画とコミュニティニーズ、施設タイプと近郊における施設利用方法、プロジェクトの財政状況、市・コミュニティ・施設オーナー

の考え方による。

４．１．１　単目的施設　　（省略）
４．１．２　多目的施設　　（省略）
４．１．３　多重災害について　　（省略）

４．２　上方向避難の概念　　（省略）
４．２．１　既存の高台を利用すること（省略）
４．２．２　高台　　（省略）
４．２．３　駐車場　　（省略）
４．２．４　コミュニティ施設　　（省略）
４．２．５　商用施設　　（省略）
４．２．６　学校施設　　（省略）
４．２．７　既存のビル　　（省略）

５．配置、距離、大きさ、高さについて　　（省略）
５．１　配置の検討　　（省略）
５．１．１　警報、移動時間、距離　　（省略）
５．１．２　施設に辿り着けること、避難可能な範囲　　（省略）
５．１．３　避難施設での災害　　（省略）
５．２　大きさの検討　　（省略）
５．２．１　滞在時間　　（省略）
５．２．２　現行の避難ガイドラインからくる推奨床面積（省略）
５．２．３　津波短期避難者に対する最小床面積推奨値　（省略）
５．３　高さの検討　　（省略）
５．４　避難施設の大きさ　　（省略）

６　設計荷重と構造設計基準

６．１　現在利用できる構造設計基準

津波により生じる荷重に関するガイドラインはほとんど存在しない。既存のものは、基本的に、河川氾濫や高潮により生じる荷重に焦点を当てている。これらから津波荷重を推定する。

６．１．１　米国における現行の基準

International Building code 付録 G
設計洪水と耐洪水構造について記述されている。

ASCE/SEI Standard 24-05 Flood Resistant Design and Construction

耐洪水設計と洪水災害地域にある構造物の建設に対する最低限の仕様を記述している

ASCE/SEI Standard 7-05 Minimum Loads for Buildings and Other Structures
洪水が構造物におよぼす力・波力を説明している。

FEMA 55 Coastal Construction Manual
本書は FEMA のもっとも最新の海岸域の地震および津波荷重に関する研究成果を含んでいる。および、海岸域に建てられる低層１世帯・２世帯住宅に対して書かれている。

City and County of Honolulu Building Code, Chapter 16 Article 11
16-11.5(f) structural design of buildings and structures subject to tsunami

６．１．２　現行の設計基準の概要
構造物は、予想される津波水深、圧力、速度、衝撃、浮力、その他に対して十分抵抗できるものであること。また大きな津波が予想される地域では、津波から過度の荷重を受けることをさけるため、壁・仕切り板が破壊されることが必要である。基礎の長期浸食、嵐起因の浸食、局所的洗掘に対する影響を検討すること。

６．１．３　津波荷重に対する現行基準の限界
津波荷重を計算するには、津波の水深と速度が必要であるが、どちらも精度のよい値が得られるものではない。また、現基準で浮遊物の衝突が考慮されているが、衝撃は浮遊物の質量、速度、衝突の持続時間、に依存する。
基礎の浸食は次のふたつのメカニズムがある。
①せん断力によるもの、②液状化によるもの
６．２　施設の要求仕様
施設の耐津波性能をきめるのにもっとも難しいことは、どのくらいのめったにこないが強力なつなみを最大津波とするか、ということである。

６．２．１　津波に対する施設の要求仕様
残念ながら、最大津波を定義する公共なハザードマップは存在しない。また、確かな最大津波を定義する確固たる指針はない。現状での方法は第３章を参照のこと。
本ガイダンスに則って設計された津波避難施設は、設計津波が最大津波と一致すると仮定のもとに、安定した避難所として機能するものであると言える。（原文：Vertical evacuation structures designed in accordance with the guidance presented in this document would be expected to provide a stable refuge when subjected to a design tsunami event consistent with the Maximum Considered Tsunami identified for the local area.）
一般的に、最大津波は非常にまれに起こるものであるが、大きな被害をもたらすポテンシャルをもっている。ほとんどの津波避難施設は大きな津波災害を受けたあと、修復可能であるが、修復するのがよいか再設置するのがよいかは、ケースバイケースで異なる。

６．２．２　地震・風に対する施設の要求仕様

地震・風に対する施設の要求仕様は、病院、警察、消防署のような緊急時利用施設の要求仕様に矛盾しないものである。

６．３　地震荷重

国際建造物基準(the International Building Code)が参照する ASCE/SEI 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structured for its seismic requirements)による。

６．３．１　地震源に近い場所で津波

津波に先立って大きな地震が避難施設に作用するだろうことを考慮する

６．３．２　地震源に遠い場所で津波

地震の作用は無いだろうけれども、地震に対する考慮をしておくこと

６．４　風荷重

国際建造物基準(the International Building Code)が参照する ASCE/SEI 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structured for its seismic requirements)による。

６．５　津波荷重

次の津波荷重を考慮すること

(1)静水圧
(2)浮力
(3)流体力
(4)衝撃力
(5)浮流物の衝撃力
(6)浮遊物の堰き止め
(7)床を持ち上げる力
(8)床にのしかかる力

６．５．１ 津波荷重効果を評価するときの重要な仮定

津波荷重は次のことを仮定して決定される。

津波の流れは土砂と海水の混合物である。ほとんどの場合、浮遊砂濃度は１０％を越えない。したがって、海水の中に１０％の浮流砂を仮定し、津波の流体密度を $1200kg/m^3$ とする。

過去の津波観測データからくる経験的な判断から、津波遡上高は予想された最大遡上高の１．３倍にとる。

津波氾濫の不確かさから、数値シミュレーションから津波パラメータ（流速、水深、運動量フラックス）を決めるとき、その値は、付録 E、式 6-6、式 6-9、図 6-7 から得られる解析値の８０％より小さい値をとってはいけない。

６．５．２ 流体の静水力

$$F_h = \rho_c \cdot A_w = \frac{1}{2}\rho_s \cdot g \cdot b \cdot h_{\max}^2 \qquad (6\text{-}1)$$

ここで

F_h：壁に加わる力(N)，　ρ_c：静水圧，　A_w：壁の浸水した部分の面積

ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度($1200kg/m^3$)

g：重力加速度($9.8m/s^2$)，　b：壁の幅(m)，　$h_{\max}$：壁の基礎からの水深(m)

壁が完全に浸水したときは、

$$F_h = \rho_c \cdot A_w = \frac{1}{2}\rho_s \cdot g \cdot (h_{\max} - \frac{h_w}{2}) \cdot b \cdot h_w \qquad (6\text{-}2)$$

ここで

h_w：壁の基礎から高さ(m)

ここで、最大水深は以下のようにとる。

$$h_{\max} = 1.3R^* - z_w = R - z_w$$

ここで、

R^*：予想された津波の最大遡上高(m)

R：予想された津波の最大遡上高の１．３倍(m)

z_w：壁の基礎の標高(m)

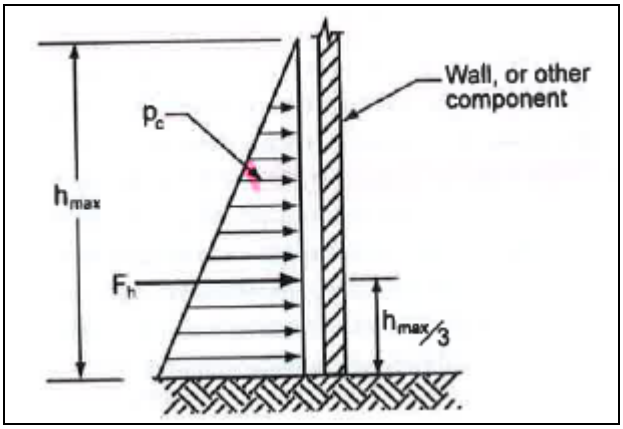


図 6-2　壁に働く力(合力)の位置

６．５．３　浮力

浮力は置き換えられた体積の重心に働く。浮力の大きさは置き換えられた流体の重さである。浮力は構造物の自重で抵抗される。もし、浮力に耐える十分な自重がない場合、引っ張りパイルが浮力に抵抗するため用いられる。しかし、予想されるパイル上部の基礎の洗掘により、パイル側面の摩擦力が弱まり、浮力に抵抗する力が弱まることを考慮しなければならない。

$$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V$$

ここで、

F_b ：浮力(N)，　　ρ_s ：浮遊物を考慮した氾濫水の密度($1200kg/m^3$)

g ：重力加速度($9.8m/s^2$)，　　V ：氾濫水に沈んだ建物内の空隙部分の体積(m^3)

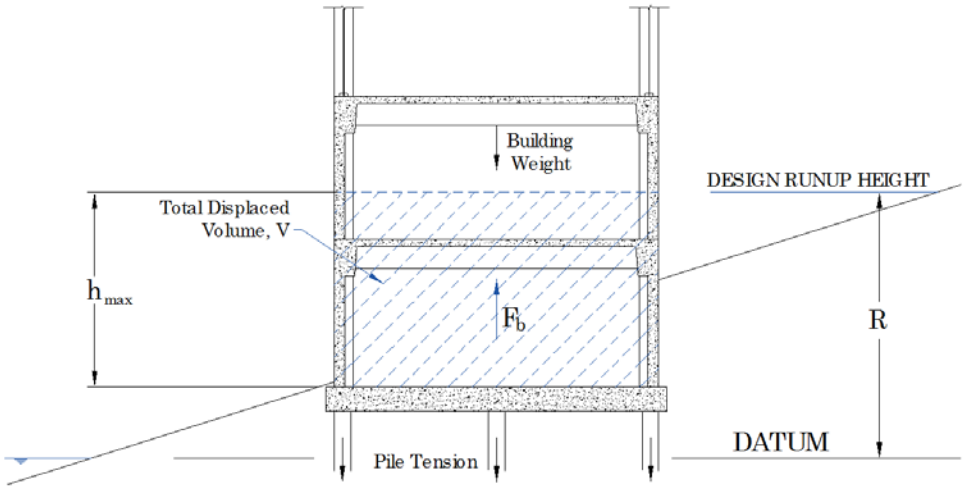


図 6-3 浮力

６．５．４ 流体力

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max} \qquad (6.5)$$

F_d：流体力(N)，　ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度($1200kg/m^3$)

C_d：形状抵抗係数(無単位,推奨値 2.0)，　B：構造物の幅(m)，　h：水深(m)

u：速度(m/s)

$(hu^2)_{\max}$は詳細な数値シミュレーションで得ることができる。

なお、$(hu^2)_{\max}$は$h_{\max}\cdot u^2_{\max}$ではない。

ただし、$(hu^2)_{\max}$はおよそ次式で求めることができる。

$$(hu^2)_{\max} = g\cdot R^2\cdot(0.125 - 0.235\cdot\frac{z}{R} + 0.11\cdot(\frac{z}{R})^2) \qquad (6.6)$$

ここで

R：$R = 1.3\times R^*$（m），　R^*：予想された津波の最大遡上高(m)

z：構造物基礎の標高(m)，　g：重力加速度($9.8m/s^2$)

数値シミュレーションから得られた $(hu^2)_{\max}$ を用いる場合、式 6-6 から得られた値の８０％より小さい値をとってはいけない。式(6.6)の背景情報を付録 E に示す。

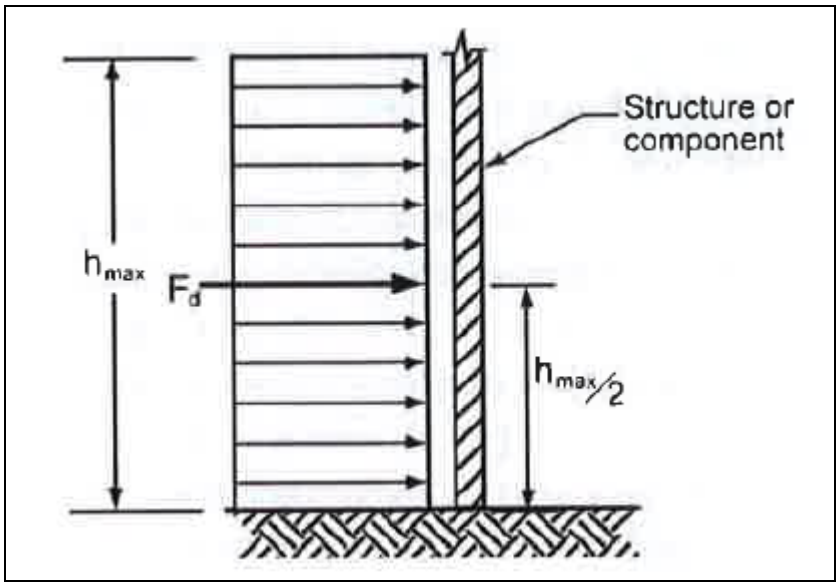


図 6-4　流体力

６．５．５ 衝撃力

津波正面で立ち上がった段波による衝撃力で次式が推奨されている。

$$F_s = 1.5 \cdot F_d \qquad (6.7)$$

ここで

F_s：衝撃力(N)，　F_d：流体力(N)　流体力は式(6.5)を参照のこと

６．５．６ 浮遊物の衝撃力

浮遊物(流木、漂流ボート、輸送コンテナ、自動車、建物)は構造物にダメージを与える大きな要因である。残念ながら、その力を精度良く見積もることは難しい。衝撃力の背景を付録Ｄに示す。衝撃力は次式で評価される。

$$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} \qquad (6.8)$$

ここで、

F_i：衝撃力(N)，　C_m：質量定数(無単位，推奨値 2.0，原文 added mass coefficient)

$u_{\max}$：最大流速(m/s)，　k：有効剛性(N/m)，　m：浮遊物の質量(kg)

（※　有効剛性：k　　$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_m}$　　k_l：浮遊物の剛性　　k_m：構造物の剛性）

単位の解説

$$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot mass} = NonDim \cdot m/s \cdot \sqrt{kg \cdot N/m}$$

$$= \frac{m}{s} \cdot \sqrt{kg \cdot (kg \cdot \frac{m}{s^2})(\frac{1}{m})} = \frac{m}{s} \cdot \sqrt{\frac{kg^2}{s^2}} = \frac{m}{s} \cdot \frac{kg}{s} = kg \cdot \frac{m}{s^2} = N$$

浮遊物のおおよその質量と有効剛性

浮遊物名	質量（kg）	有効剛性（N/m）
流木	450	2.4×10^6
４０フィート・標準輸送コンテナ	3800(空の状態)	6.5×10^8
２０フィート・標準輸送コンテナ	2200(空の状態)	1.5×10^9
２０フィート・ヘビー輸送コンテナ	2400(空の状態)	1.7×10^9

注）１フィートは約０．３ｍ

$u_{\max}$は詳細な数値シミュレーションで得ることができる。数値シミュレーションが困難な場合、次式で求めることができる。

$$u_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot R \cdot (1 - \frac{z}{R})} \qquad (6.9)$$

ここで

R ： $R = 1.3 \times R^*$ （m）, R^* ：予想された津波の最大遡上高（m）

z ：構造物基礎の標高（m）, g ：重力加速度（$9.8m/s^2$）

(輸送コンテナの喫水ｄにより最大流速を推定する方法は省略)

数値シミュレーションから得られた $u_{\max}$ を用いる場合、式 6-8 から得られた値の８０％より小さい値をとってはいけない。式(6.9)の背景情報を付録Ｅに示す。

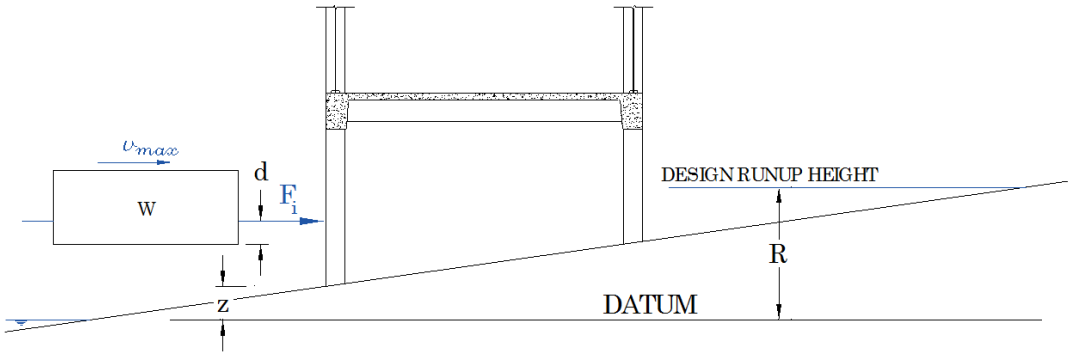


図 6-6 浮遊物の衝撃力

6．5．7　浮遊物の堰き止め

$$F_{dm} = \frac{1}{2}\rho_s C_d B_d (hu^2)_{\max}$$

$$(hu^2)_{\max} = g \cdot R^2 \cdot (0.125 - 0.235 \cdot \frac{z}{R} + 0.11 \cdot (\frac{z}{R})^2)$$

$$R = 1.3 \times R^*$$

ここで、

F_{dm}：浮遊物による流体力（N），　ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

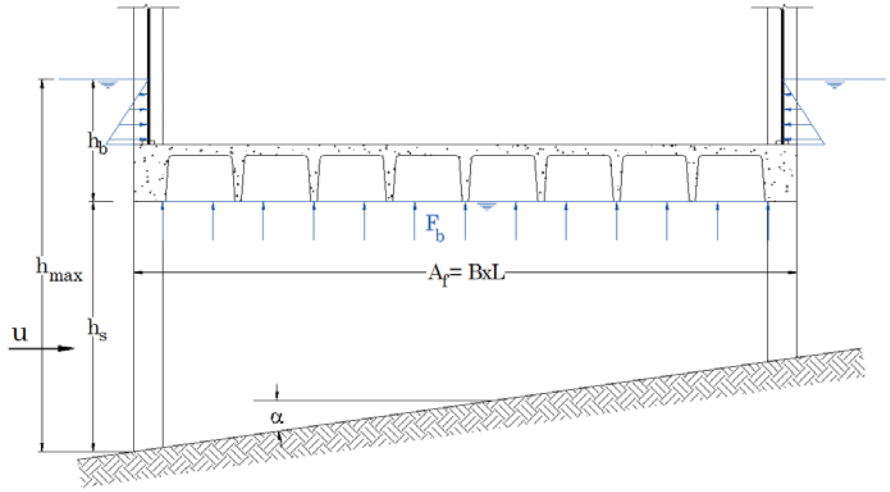
C_d：形状抵抗係数（無単位，推奨値 2.0），　B_d：浮遊物の堆積の幅（m），h：水深（m）

u：速度（m/s），g：重力加速度（$9.8m/s^2$），　R^*：遡上高，　z：水位（水深+標高，m）

６．５．８　床を持ち上げる力

$$F_b = \rho_s \cdot g \cdot A_f \cdot h_b \qquad (6\text{-}12)$$

F_b：浮力，　ρ_s：流体密度，　g：重力加速度，　A_f：床面積



また、急激な氾濫により床面に次の上向流体力が働く。

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot C_u \cdot \rho_s \cdot A_f \cdot u_v^2 \qquad (6\text{-}14)$$

ここで、

F_u：構造物に働く上向き流体力，　C_u：定数(通常 3.0)，　ρ_s：流体密度，

A_f：床面積　　u_v：流体の垂直方向速度又は上昇速度

なお、詳細な流体力学的研究がなされている場合を除き、傾いた斜面にある建築物に対しては、以下の式で流体上昇速度を見積もることができる。

$$u_v = u \cdot \tan\alpha \qquad (6\text{-}16)$$

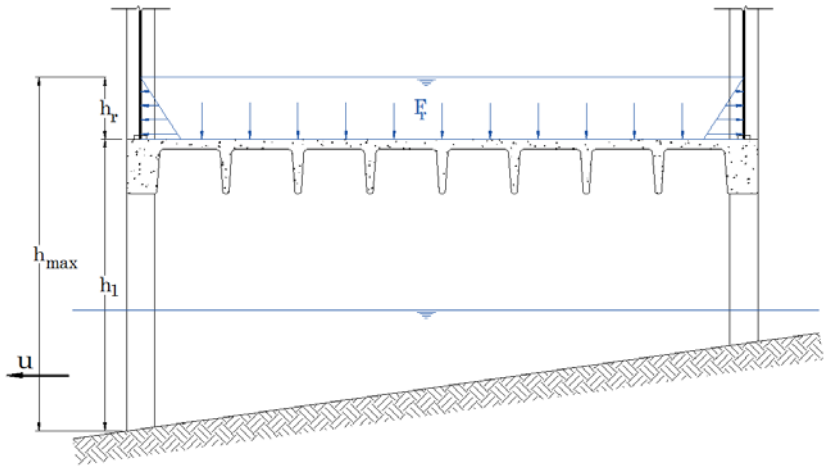
ここで、

u_v：流体の垂直方向速度又は上昇速度，　u：水平速度，　α：地面の傾斜角

６．５．９　床にのしかかる力

$$F_r = \rho_s \cdot g \cdot A_f \cdot h_r, \quad h_r = h_{\max} - h_1$$

ρ_s：流体密度，　g：重力加速度，　A_f：床面積，　$h_r, h_{\max}, h_1$：下図参照のこと



６．６　津波荷重の組み合わせ

６．６．１　構造物全体にかかる津波力の組み合わせ

浮力と上向き流体力は自重を打ち消す

流体力と衝撃力の組み合わせ

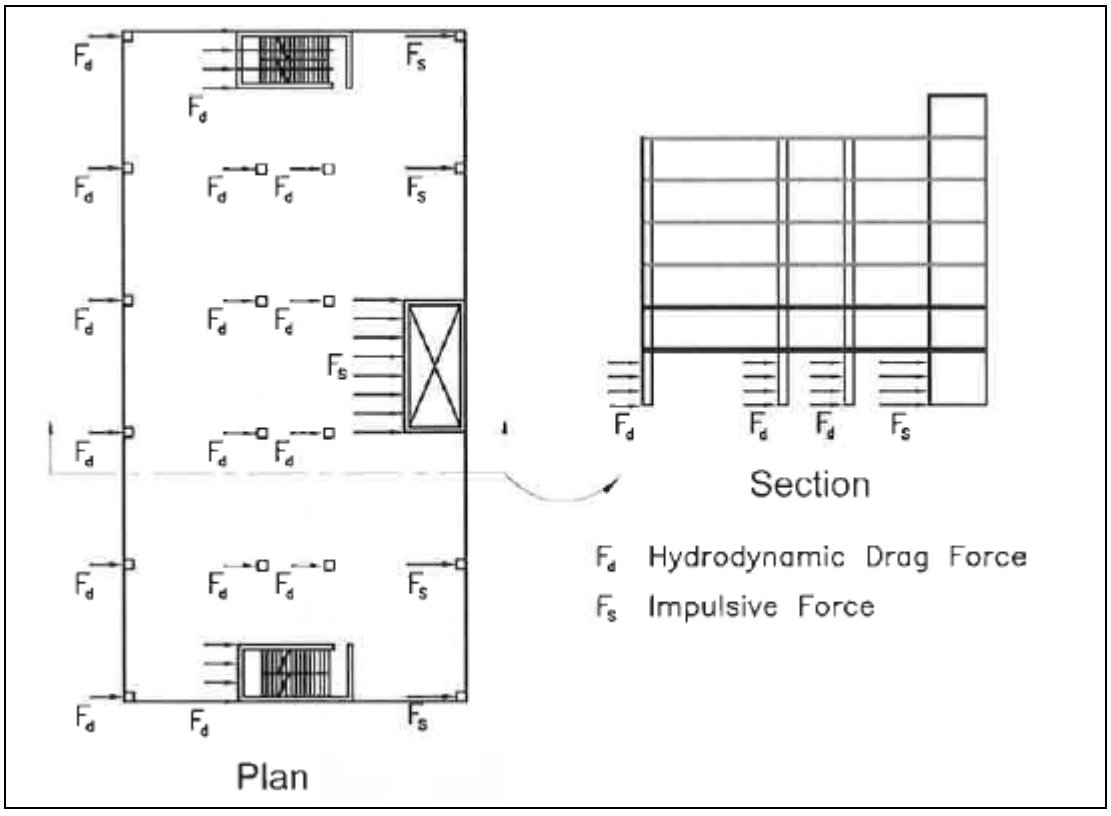


図 6-10 サンプル施設を対象に計画した流体力と衝撃力

流体力と浮遊物の衝撃力の組み合わせ
流体力と浮遊物の衝撃力は組み合わせる。たくさんの浮遊物が存在するが、それらが同時に衝突する確率は小さいので、衝突する浮遊物はひとつとする。なお、流体力と衝撃力は組み合わせない。

浮遊物の堰き止め力と流体力の組み合わせ

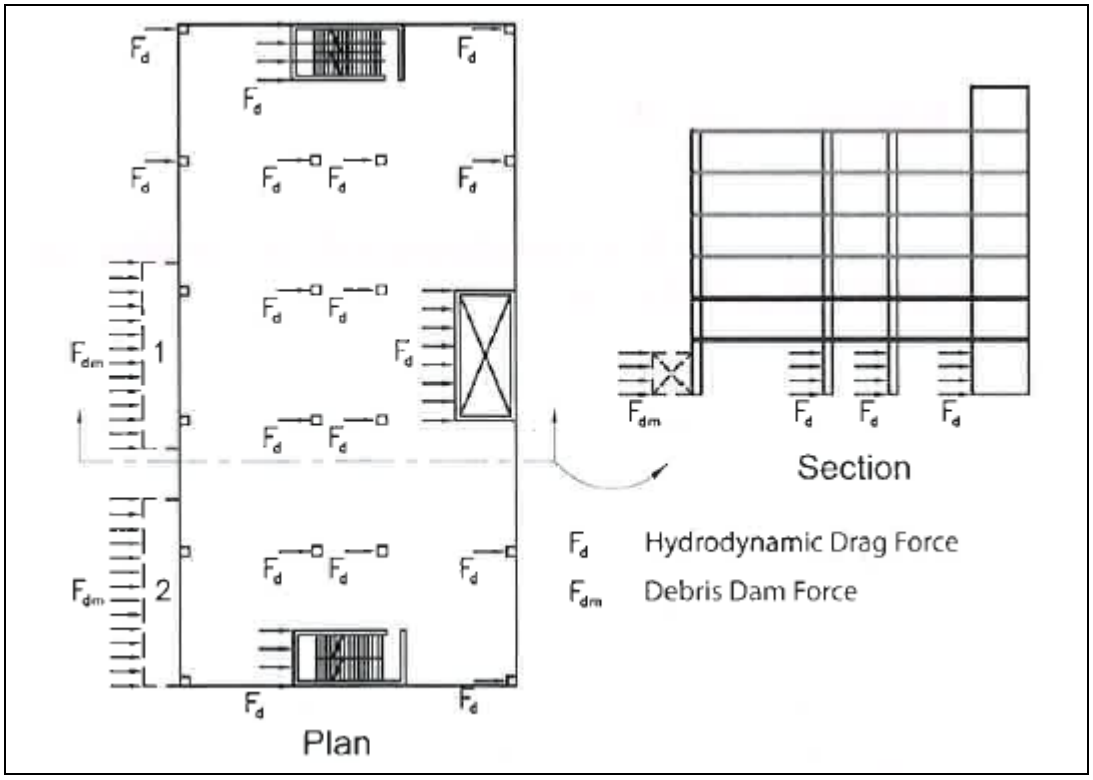


図 6-11 サンプル施設を対象に計画した流体力と浮遊物の堰き止め力

吹き飛ばされた壁は施設の構造を保つものとして作用しない。
床にのしかかる力は横方向の力とは独立にして作用する。

６．６．２　個々の要素にかかる津波力の組み合わせ
独立した構造要素(すなわち、柱、壁、梁)に対して次のように荷重の組み合わせを考えること。

最大$h \cdot u^2$に対する衝撃力

最大$h \cdot u^2$に対する流体力と浮遊物の衝撃力を組み合わせ。これはもっとも危険となる部材箇所に適用する。

浮遊物の堰き止め力

原文：Debris damming, F_{dm} due to a minimum 40-foot wide debris dam causing the worst possible loading on the member, for maximum $h \cdot u^2$

施設の防水部分を取り囲む壁に働く最大水深の静水圧

床構造部材に作用する持ち上げ力として、次の荷重組み合わせを考えること
最大水深に対して、閉じこめられた空気のため起こる浮力。
上向き流体力
最大上向き荷重ケース:床、梁、その結合部が持ち上げ力により崩壊しないことを目的に、自重の 90%と外力として働く持ち上げ力の和より大きい荷重。

水が床に溜まったことによる下向き荷重に対して、次の組み合わせ荷重を考える。
・100%自重＋床にのしかかる力

６．７　荷重の組み合わせ

荷重組み合わせ１：$1.2 \times D + 1.0 \times T_s + 1.0 \times L_{REF} + 0.25 \times L$

荷重組み合わせ２：$0.9 \times D + 1.0 \times T_s$

ここで

D：自重，T_s：津波荷重

L_{REF}：避難スペースの積載加重，L：避難スペース以外の積載加重

なお、地震荷重は組み合わせない。

６．８　部材耐力・強度設計について

津波強度設計は、現在行われている風力強度計算や地震強度計算と同じ方法での耐力計算と強度安全係数(Strength reduction factors)を適用する。

６．９　進行性崩壊

進行性崩壊を取り込んで設計するかどうかはケースバイケースである。

６．９．１　tie-force strategy　（省略）

６．９．２　Missing column strategy（省略）

７　構造設計の概念と追加的事項

７．１　耐津波構造の属性（省略）

７．２　構造物に対する津波荷重の影響について

基礎の設計は、浸食および液状化の局所的効果を考慮すること

床構造の設計は浮力および上向き流体力を考慮すること。それらは自重によるせん断力や曲げモーメントに対して、反対の力を生じるものである。

７．２．１　基礎の浸食に関する設計概念

薄い基礎周りの浸食は施設の支持構造の倒壊を誘発する可能がある。これを避けるため、場所打ち杭、打ち込み杭を持つ基礎で設計することが考えられる。しかしながら、パイルキャップ、杭の上部先端が露出しても全荷重に耐えることができなければならない。Dames and Moore は海岸からの距離と土壌タイプにより、浸食深を表１のように推奨している。

表１　おおよその浸食深(水深に対する％)

土壌タイプ	海岸から 300feets(90m)以内にあるときの浸食深(水深に対する％)	海岸から 300feets (90m)以上離れているのときの浸食深(水深に対する％)
軟弱砂	80	60
砂	50	35
柔らかいシルト	50	25
硬いシルト	25	15
やわらかいクレイ	25	15
硬いクレイ	10	5

７．２．２　ブレークアウェイ壁

予想される津波高さより低い部分は、静水圧、浮力、流体力、衝撃力が施設全体に影響することを制限するため、意識的に破壊されるよう設計することが考えられる。このことはレポート FEMA55 Coastal Construction manual に詳細が記述されている。

７．３　現行構造物の改造およびレトロフィットに対する考え方(省略)
７．４　上方避難構造物の許可と品質保証(省略)
７．４．１　ピュアレビュー(省略)
７．４．２　品質保証／品質コントロール(省略)
７．５　上方避難構造物の計画について(省略)
７．６　上方避難構造物の費用について(省略)

FEMA-P646 による津波荷重の試算

FEMA-P646 に記述されている津波荷重の計算式を使って、高圧ガス設備に対する荷重計算を行い、今後の課題および問題点を検討した。

１．　FEMA-P646 に記述されている津波荷重の計算式

FEMA-P646/June 2008, ‘Guide line for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis’ に、津波避難ビルを設計するに当たり必要となる津波荷重の計算式が記述されている。対象とする構造物は建物である。津波荷重を計算するには、最大津波水深等が必要となるが、これは数値シミュレーションによるか、津波遡上高を仮定して簡易式で求めることとなっている。簡易式は記述されているが、数値シミュレーションによる方法は具体的には記述されていない。

津波荷重の一覧を表 5.1-1 に示す。

津波荷重を計算するには、津波の最大水深、津波の最大流速、水深と流速二乗の積の最大値、が必要となるが、これは表 5.1-2 に示す簡易式で求めても良いことになっている。表 5.1-1、表 5.1-2 で使われる記号の説明を、表 5.1-3 に示す。

※FEMA（アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁 Federal Emergency Management Agency of the United States）

表 5.1-1 FEMA-P646 に記述されている津波荷重

	名称	式	備考
1	静水力	$F_h = \frac{1}{2}\rho_s \cdot g \cdot b \cdot h_{\max}^2$	片方にのみ水が壁にのしかかった時に起こる静水圧の和のアンバランス
2	浮力	$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V$	アルキメデスの原理による浮力
3	流体力　注 1)	$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max}$	一様流速の中に置かれた物体にかかる抗力
4	衝撃力	$F_s = 1.5 \cdot F_d$	波が最初にぶつかったときに構造物に及ぼす力。流体力の１．５倍を取る。
5	浮遊物の衝突力	$F_i = C_m \cdot u_{\max}\sqrt{k \cdot m}$	浮遊物が衝突したときに構造物に及ぼす力
6	浮遊物を堰き止めたことにより発生する流体力	$F_{dm} = \frac{1}{2}\rho_s C_d B_d (hu^2)_{\max}$	浮遊物がひっかかったことにより、断面が増加したことによる抗力
7	床を持ち上げる力	$F_b = \rho_s \cdot g \cdot A_f \cdot h_b$　及び $F_v = \frac{1}{2} \cdot C_u \cdot \rho_s \cdot A_f \cdot u_v^2$	床にかかる浮力と、水面上昇速度による上向き抗力
8	床にのしかかる力	$F_r = \rho_s \cdot g \cdot A_f \cdot h_r$	津波が引いたとき、床に海水が残った場合のその自重。

注1)　収集資料 3-010(東京大学生産技術研究所平成 23：年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その２)に FEMA の流体力は抗力式であると記述されている。したがって、FEMA 流体力式の中の h は、構造物の高さを大きく越えないことを想定している。

表 5.1-2 津波の特性量の簡易計算式

津波の特性量	式	備考
最大水深	$h_{\max} = 1.3R^* - z_w = R - z_w$	静水力、床にのしかかる力(浮力)に用いる h_b、床にのしかかる力に用いる h_r の計算、に用いる
最大流速	$u_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot R \cdot (1 - \frac{z_w}{R})}$	浮遊物の衝突力を計算するときに用いる。
水深と流速二乗の積の最大値	$(hu^2)_{\max} = g \cdot R^2 \cdot (0.125 - 0.235 \cdot \frac{z_w}{R} + 0.11 \cdot (\frac{z_w}{R})^2)$	流体力を計算するときに用いる

表 5.1-3　記号の説明

	記号	意味	単位	備考
1	F_h	壁に加わる静水力	N	
2	F_b	浮力	N	
3	F_d	流体力	N	
4	F_s	衝撃力	N	
5	F_i	浮遊物の衝突力	N	
6	F_{dm}	ひっかかった浮遊物により発生する流体力	N	
7	F_v	床に働く上向き流体力	N	
8	F_r	床にのしかかる力	N	
9	ρ_s	浮遊物を考慮した氾濫水の密度	kg/m^3	1200 を推奨
10	g	重力加速度	m/s^2	通常 9.8
11	$h_{\max}$	壁の基礎からの水深	m	
12	V	氾濫水に沈んだ建物内の空隙部分の体積	m^3	
13	C_d	形状抵抗係数	無単位	推奨値 2.0
14	B	構造物の幅	m	
15	h	水深	m	
16	u	速度	m/s	
17	C_m	付加質量定数(added mass coefficient)	無単位	推奨値 2.0
18	$u_{\max}$	最大流速	m/s	
19	k	有効剛性	N/m	
20	m	浮遊物の質量	kg	
21	B_d	ひっかかった浮遊物の幅	m	
22	A_f	床面積	m^2	
	h_b	床から建物の外にある水面までの高さ	m	
23	h_r	床のしっかかった水の厚さ	m	
24	R^*	遡上高	m	
25	R	遡上高の１．３倍	m	
26	z_w	構造物の基礎の標高	m	

２．用語の定義

本文書において用いる用語の定義とその出所。同一用語で異なる定義が見られるものついては、研究者による定義を採用した。

表 5.1-4

	定義	出所
平均海水面または平均海面	潮汐、風、波によって変化する海水面の平均的な水面位置。	収集文献 7-015
標高	日本においては、東京湾の平均海水面から測った地表までの高さ	収集文献 7-016
浸水深 注 1）注 2	陸上に上った津波の地面から水面までの高さ	陸上構造物の耐津波性能評価手法の確立　収集文献 3-003
浸水高 注 1）注 2)	陸上に上った津波の平均海面から水面までの高さ	陸上構造物の耐津波性能評価手法の確立　収集文献 3-003
遡上高 注 1)	津波が陸上を遡上し、その先端が最終的に到着した位置の標高	陸上構造物の耐津波性能評価手法の確立　収集文献 3-003
モーメンタムフラックス　注 3)	水深と流速の二乗の積	FEMA-P646
静水力 注 4)	構造物や物体の正面側と反対側の水深差により働く力。	FEMA-P646
流体力 注 5)	流体の流れの中に置かれた物体に働く力（抗力に同じ）	FEMA-P646
衝撃力 注 6)	津波が構造物に最初にぶつかったときに及ぼす瞬間的な力	収集文献,7-019,7-020
衝突力	理論的には、衝突物が衝突瞬間から静止するまでに起こす運動量の変化を衝突時間でわったもの	収集文献,7-021

浸水深、浸水高、遡上高の概念図(収集文献 4-007 より)

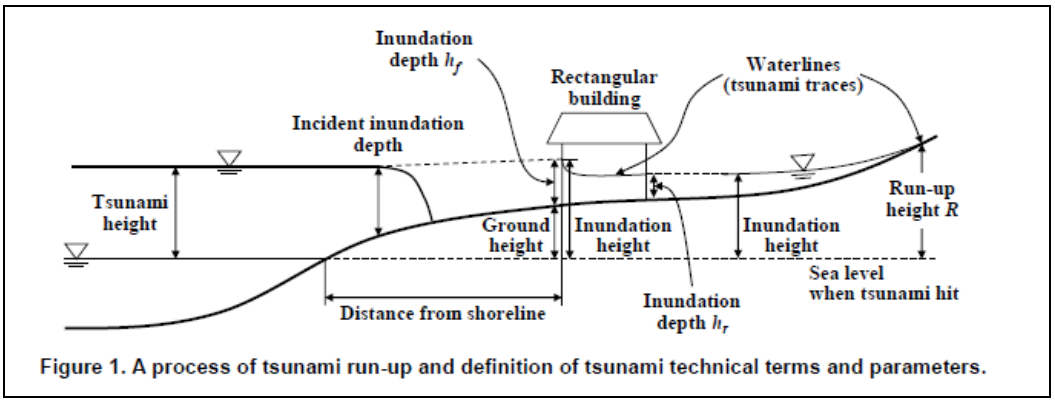


Figure 1. A process of tsunami run-up and definition of tsunami technical terms and parameters.

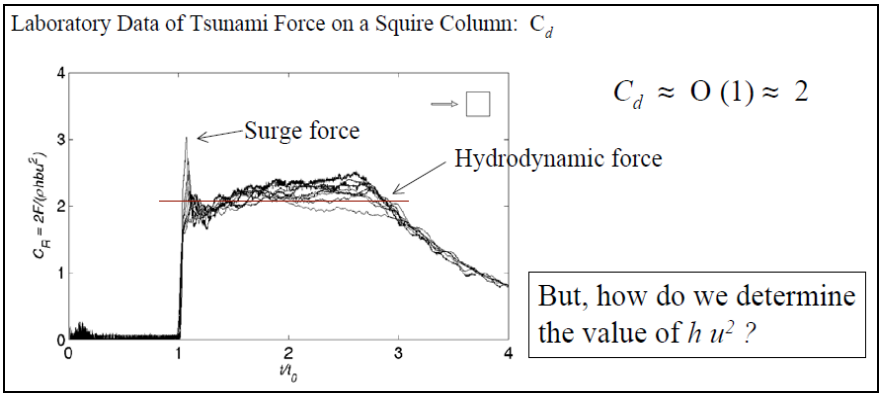
注１） 津波防災マニュアル(収集文献 6-001)は浸水深を浸水高、浸水高を痕跡高と定義している。

注２） FEMA-P646 の Appendix E (E.2,P134)で使われている言葉をカタカナ表記した。ただし、FEMA-P646 本文ではこの用語は使っておらず、常に $h \cdot u^2$ と表記している。Momentum flux という言葉は、Yeh, H., 2006, Maximum Fluid Forces in the Tsunami Runup Zone, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, ASME, Vol132, pp.496 で使われている。

注３） Hydrostatic force の直訳。Hydrostatic pressure は静水圧と訳される。例えば、収集文献 7-017(本間仁：標準水理学)。

注４） Hydrodynamic force の直訳。収集文献 7-018(村上・BUI・中尾・伊津野：橋梁に作用する津波の流体力と橋梁に関する SPH 法解析)において、流体力を Hydrodynamic force と訳している。なお、この論文の筆者は抗力と揚力をあわせて流体力と呼んでいるが、FAMA-P646 においては抗力のみを流体力と呼んでいる。

注５） 収集文献 7-019(片岡・日下部・長屋：津波衝突時に橋桁に作用する波力)に衝突波力として説明されている。及び収集文献 7-020(Harry Yeh)に衝撃力と流体力の違いを示す以下の実験結果を示している。


Laboratory Data of Tsunami Force on a Squire Column: C_d
$C_d \approx O(1) \approx 2$
Surge force
Hydrodynamic force
But, how do we determine the value of $h\,u^2$?

３．　計算の対象としたモデル

（１）	形状	横置き完全円筒
（２）	貯蔵能力	20 トン（プロパン級）
（３）	内容積	47 立方メートル
（４）	全長	10 メートル
（５）	直径	2.5 メートル
（６）	重量	9.0 トン
（７）貯槽・長軸方向の方位		津波来襲方向に直角
（８）津波水深		2.5m　を想定
（９）貯槽のかさ上げ		なし。貯槽本体を地面にジカに置きを想定。
（１０）貯槽位置の標高		4m
（１１）遡上高		貯槽位置の標高と津波水深を足した値

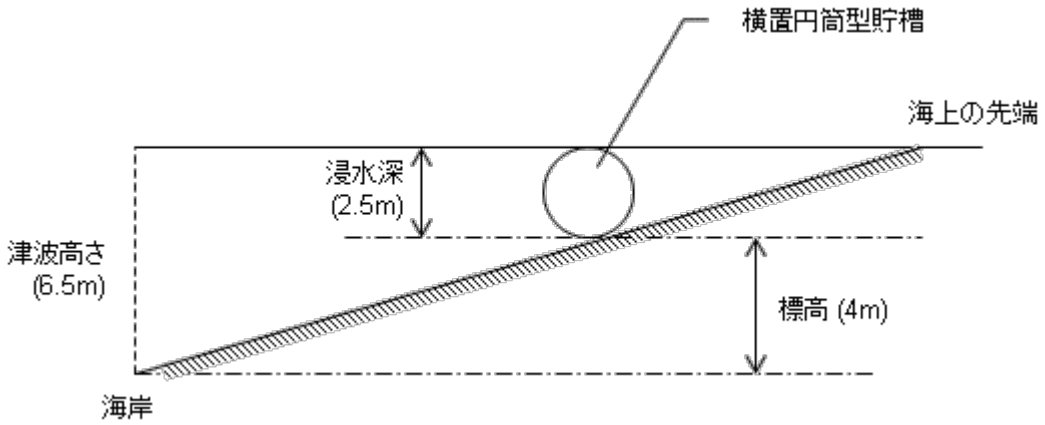


図 5.3-1 計算モデル図：水深 2.5m,

４．　計算

４．１　浸水深、流速、$(h\cdot u^2)_{\max}$

（１）浸水深

浸水深は２．５メートル（水深は、貯槽を完全に冠水させる。）

（２）貯槽下端の標高

４ｍを仮定する。

（３）遡上高

浸水深＋貯槽下端の標高とする。なお、遡上高の１．３倍は行なわず$R = R^*$とする。

（４）流速

$u_{\max} = \sqrt{2\cdot g\cdot R\cdot(1-\frac{z}{R})}$で推定する。

ここで、R：遡上高（m）、z：構造物基礎の標高（m），g：重力加速度（$9.8m/s^2$）

（５）　$(h\cdot u^2)_{\max}$　　(momentum flux)

$(hu^2)_{\max} = g\cdot R^2\cdot(0.125-0.235\cdot\frac{z}{R}+0.11\cdot(\frac{z}{R})^2)$で推定する。

ここで、R：遡上高（m）、z：構造物基礎の標高（m），g：重力加速度（$9.8m/s^2$）

表 5.4.1-1

浸水深(m)	遡上高(m)	流速(m/s) カッコ内$(km/hour)$	$(hu^2)_{\max}$ (m^3/s^2)
2.5	6.5	7(25)	9

４．２　静水力

FEMA-P646 は、静水力は常に作用面に垂直に働く力で、反対側の水深との差により生じるものである、と述べている。これに対し、横置円筒形貯槽は反対側との水深差はないので、静水力は生じない。したがって、F_h＝零トン

４．３　浮力

アルキメデスの原理により、計算する。

$$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V$$

ここで、F_b：浮力（N），ρ_s：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

g：重力加速度（$9.8m/s^2$）、V：氾濫水に沈んだ貯槽の体積（m^3）

貯槽の体積は$V = \pi \cdot r^2 \cdot L = 3.14 * 1.25^2 * 10 = 49m^3$

これより、空の場合は$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V = 1200 \times 9.8 \times 49 \approx 5.8 \times 10^5 (N) \approx 58tonf$

これより、半分の容量が充填されている場合は$F_b = 58tonf - 10tonf = 48tonf$
これより、容量一杯に充填されている場合は$F_b = 58tonf - 20tonf = 38tonf$

推定した本体重量９トンを引くことにより、上向き荷重は
空の場合　　$F_b = 49tonf$
半分満たされている場合　$F_b = 39tonf$
満杯の場合　　$F_b = 29tonf$

表 5.4.3-2　結果のまとめ

充填率	空	半分充填	満杯
上向き荷重　N （$tonf$）	4.9×10^5 （49）	3.9×10^5 （39）	2.9×10^5 (29)

４．４　流体力

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max}$$

F_d ：流体力（N），ρ_s ：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200kg/m^3$）

C_d ：形状係数(無単位, 推奨値 2.0 を採用)，B ：構造物の幅（m），h ：浸水深（m）

u ：流速（m/s）

水深 2.5m　$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max} = \frac{1}{2}\times 1200\times 2\times 10\times 9 = 1.08\times 10^5 N \approx 11tonf$

表 5.4.4-1

水深 （m）	流体力-FEMA N （$tonf$）
2.5	1.1×10^5 （11）

４．５　衝撃力

$$F_s = 1.5\cdot F_d$$

ここで、F_s ：衝撃力（N），　F_d ：流体力（N）

表 5.4.5-1

水深 （m）	流体力-FEMA N （$tonf$）	衝撃力 N （$tonf$）
2.5	1.0×10^5 （10）	1.5×10^5 （15）

４．６　浮遊物の衝突力

$$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m}$$

ここで、F_i:衝撃 力（N）， C_m:付加質量定数(無単位，推奨値 2.0)、$u_{\max}$:最大流速（m/s），k:有効剛性（N/m），m:浮遊物の質量（kg）

450kg の流木が衝突したことを仮定する。
FEMA-P646,Table6-1 よりこれの有効剛性は$2.4\times10^6\,N/m$。これより、

水深　2.5m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0\times7\times\sqrt{2.4\times10^6\times450} \approx 4.6\times10^5\,N \approx 46tonf$

４．７　浮遊物を堰き止めたことにより発生する流体力
まわりに堰き止める浮遊物がないと仮定して、なし

４．８　床を持ち上げる力
なし

４．９　床にのしかかる力
なし

４．１０　結果の総括表

表 5.4.10-1

水深 （m）	静水力 N （$tonf$）	浮力(空) N （$tonf$）	流体力 -FEMA N （$tonf$）	衝撃力 -FEMA N （$tonf$）	衝突力 N （$tonf$）
2.5	0	4.9×10^5 (49)	1.1×10^5 (11)	1.5×10^5 (15)	4.6×10^5 (46)

４．１１　津波力の重ね合わせ

（１）津波力の組み合わせ

FEMA-P646 では構造全体に働く津波荷重と、構造のある部分(要素)に加わる津波荷重の２つのケースに分けて記述されている。横置円筒貯槽は本体貯槽のひとつのみの要素と考えられるので、ここでは構造全体に働く津波荷重のみを考える。

津波荷重は次のように計算する。

(垂直方向の津波力)

(ｱ)浮力と水面上昇による上向き流体力の和とする。

(水平方向の津波力)

(ｲ)時系列を考えて最悪のケースを採用する。

(ｳ)浮遊物の衝突力は考えられるもっとも大きなものひとつとする。

(ｴ)浮遊物の衝突力は流体力と重ね合わせる(衝撃力とは重ねあわせない)

(ｵ)浮遊物を堰き止めたことにより、構造物の津波の受圧面積が大きくなることが予想される場合、その面積を考えて流体力を計算する。

これらを勘案して津波力を求める。

(垂直方向の津波力)

(浮力)＋(水面上昇による上向き流体力)= $49\times10^4 N + 0N = 49\times10^4 N$

(水平方向の津波力)

貯槽に作用する津波力の時系列は次のとおり。

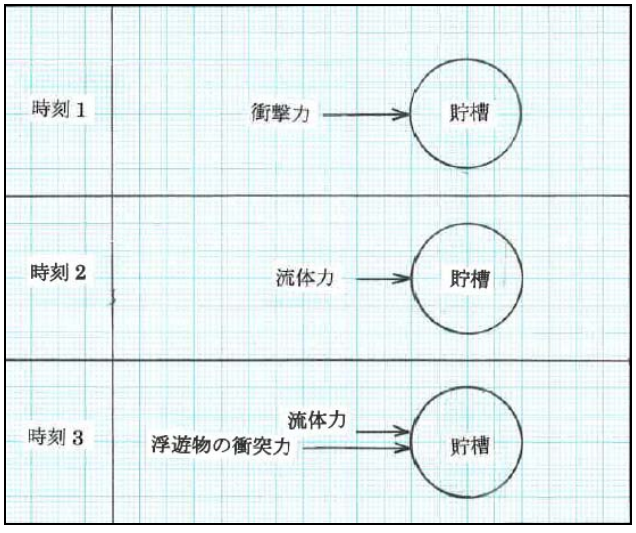


図 5.4-1 津波荷重の時系列

表により、これらの荷重は下表のごとくとなる。

表 5.4-7 水平方向津波力の計算

時刻	作用する津波力	荷重値($\times 10^5 N$)	備考
1	衝撃力	1.5	
2	流体力	1.1	
3	流体力+衝突力	1.1+4.6=5.7	水平方向津波力として採用

したがって津波荷重は次表のとおり。

表 5.4-8 津波力の計算

荷重の方向	荷重値($\times 10^5 N$)
垂直(上向き)	4.9
水平	5.7

（2）垂直方向の自重荷重の組み合わせ

自重と津波荷重の組み合わせた際に、以下の 2 つのケースに場合分けされている。即ち、垂直方向津波力が重力方向（下向き）のときは以下に示されている式の荷重組み合わせ 1 を用い、上向きのときは 2 を用いる。

・荷重組み合わせ 1：$1.2\times D+1.0\times T_s+1.0\times L_{REF}+0.25\times L$

・荷重組み合わせ 2：$0.9\times D+1.0\times T_s$

ここで

D ：自重，T_s ：津波荷重

L_{REF} ：最大避難者数による積載加重(避難スペース用)

L ：最大避難者数による積載加重(避難スペース以外のフロア用)

なお、L_{REF} と L の値は同じ。

今回のケースでは、前計算結果から横置円筒貯槽は常に荷重組み合わせ 2 を使うと考えられる。

前節（1）で計算した津波力にこれを適用する。表 5.4-8 の垂直方向の津波力 49×10^4N は、本体重量を引いた値であるので、もとの数値で考えると、

浮力　　58×10^4N

本体重量　9×10^4N

である。これを荷重組み合わせ 2 に適用すると

上向き津波荷重$=0.9\times(-9\times10^4N)+1.0\times(58\times10^4N)=49.9\times10^4N\approx50\times10^4N$

したがって、津波荷重は次表の通り。

表 5.4-9 津波荷重の計算

荷重の方向	荷重値（$\times10^4N$）
垂直（上向き）	50
水平	57

５．ダムブレーク解による流速と FEMA 流速推定式の比較

FEMA による流速推定式とは別の理論であるダムブレーク解析により求めた流速とを比較してみた。

（１）理論と計算条件

図 5.5-1 のような理想的なダムを考える。河床勾配がなく、位置 $x=0$ にダム(壁)があり、その上流側に水深 $h=h_1$、下流側に水深 $h=h_0$ の水がある状態を考える。（初期条件が、上流側で水深 $h=h_1$・下流側で水深 $h=h_0$）。なお、上流・下流とも無限に続くものとする（境界条件無し）。及び、h_1 は h_0 に比べて、十分に大きいものとする（解析式が利用可能な条件）。

初期時刻において、このダムを一瞬にして消滅させると、その水の移動は、ダムがあった位置を中心として、図 5.5-2 のような形になることがわかっている。そして、各領域の流速・波速・水深は、同図内の記述のごとくとなり、波の先端面の速度 ω は次式で計算されることがわかっている。

$$\omega = 2a_1 + \frac{{a_0}^2}{4\omega}\left\{1+\sqrt{1+8\left(\frac{\omega}{a_0}\right)^2}\right\} - \sqrt{2}a_0\left\{\sqrt{1+8\left(\frac{\omega}{a_0}\right)^2}-1\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (3.11\text{-}1)$$

ここで、

$a_0=\sqrt{g\cdot h_0}$，$a_1=\sqrt{g\cdot h_1}$，h_0:下流側水深(m)，h_1:上流側水深(m)，g:重力加速度(m/s^2)

本式は初期条件が与えられれば、計算できる。各領域の流速・波速・水深は、速度 ω の関数となっており、速度 ω がわかれば、計算することができる。

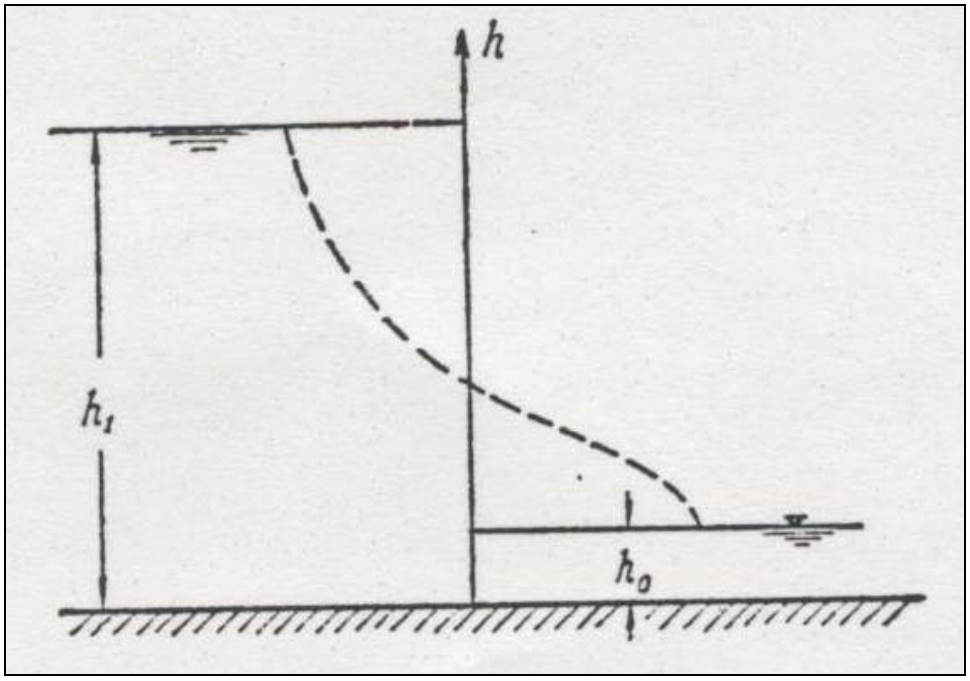


図 5.5-1

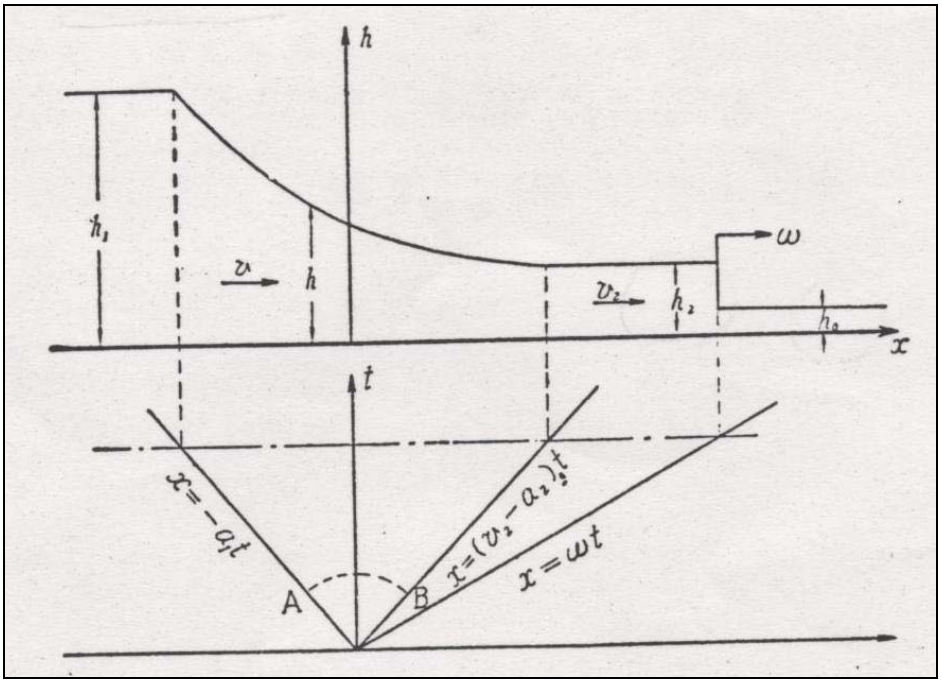
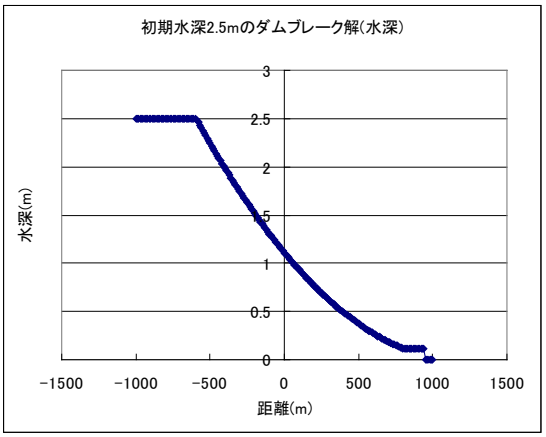


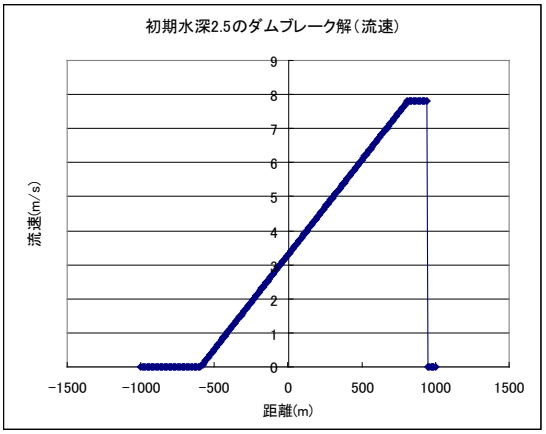
図 5.5-2

（物部　水理学　　本間他　　岩波書店）より

（２）解析結果（解析方法については次節６．を参照）

・浸水深 2.5mを解析した結果（時刻：2 分後）





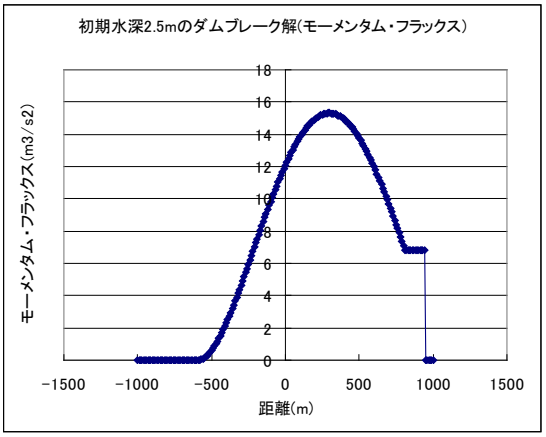


図 5.5-3

（２）流速の比較

表 5.5-1

浸水深 (m)	流速 FEMA 推測式 (m/s)	ダムブレーク最大流速 (m/s)
2.5	7	8

なお、ダム・ブレークの最大流速はある時刻における空間的広がりにおける最大値

（３）$(h\cdot u^2)_{\max}$ の比較

表 5.5-2

浸水深 (m)	流速 FEMA 推測式 (m^3/s^2)	ダムブレーク $(h\cdot u^2)_{\max}$ (m^3/s^2)
2.5	9	15

ダム側の初期水深を浸水深にとり、一次元ダムブレーク解析式より求めた流速と FEMA 流速推定式からもとめた結果を比較したところ、ダムブレーク解析式を解いたときの最大流速と FEMA 流速推定式からもとめた流速がおおよそ一致した。

６．　ダムブレーク問題の解析解計算方法

ダムブレーク問題の解析解計算方法とその手順は以下の通り。

既知量　下流側初期水位h_0,流側初期水位h_1,及び重力加速度g

step-1　a_0, a_1を求める。$a_0 = \sqrt{g \cdot h_0}$, $a_1 = \sqrt{g \cdot h_1}$

step-2　次式を満たす波速ωを求める。
（解析解を求めるプログラムは、初期値を$\omega = 2 \times a_1$、加速係数 0.5 での単純反復法を採用した。）

$$\omega = 2a_1 + \frac{{a_0}^2}{4\omega}\left\{1+\sqrt{1+8\left(\frac{\omega}{a_0}\right)^2}\right\} - \sqrt{2}a_0\left\{\sqrt{1+8\left(\frac{\omega}{a_0}\right)^2}-1\right\}^{\frac{1}{2}}$$

step-3　次式より流速v_2を求める。

$$v_2 = \omega - \frac{{a_0}^2}{4\omega}\left\{1+\sqrt{1+8\left(\frac{\omega}{a_0}\right)^2}\right\}$$

step-4　次式よりa_2を求める。

$$a_2 = a_1 - \frac{1}{2}v_2$$

step-5　次式よりh_2を求める。

$$h_2 = \frac{{a_2}^2}{g}$$

step-6　各時刻,各位置の水深h,流速vを次のように求める。

$\omega t < x < \infty$　　；　$h = h_0$,　$v = 0$

$(v_2 - a_2)t < x < \omega t$　；　$h = h_2$,　$v = v_2$

$-a_1 t < x < \omega t$　　；　$h = \dfrac{(\frac{2a_1 - x/t}{3})^2}{g}$

$$v = \frac{2}{3}(a_1 + \frac{x}{t})$$

$-\infty < x < -a_1 t$　　；　$h = h_1, v = 0$

７．　ダムブレーク解析解より得た $(h\cdot u^2)_{\max}$ を用いての抗力計算

ダムブレーク解析解計算プログラムより $(h\cdot u^2)_{\max}$ を計算して、これを FEMA の流体力計算式に代入して求めた抗力を下表に示す。FEMA $(h\cdot u^2)_{\max}$ 近似式を用いた値より、1.6 倍程度大きくなっているが、おおよそ同じ値を得たといえる。

表 5.7-1 ダムブレーク解析解計算プログラムより求めた $(h\cdot u^2)_{\max}$ による流体力

津波水深 (m)	ダムブレーク解析による $(h\cdot u^2)_{\max}$ (m^3/s^2)	①ダムブレーク解析による抗力 N (tonf)	②FEMA 式による抗力 N (tonf)	①/②
2.5	15.3	18×10^5 (18)	1.1×10^5 (11)	1.6

FEMA 近似式、$(hu^2)_{\max} = g\cdot R^2\cdot(0.125-0.235\cdot\frac{z_w}{R}+0.11\cdot(\frac{z_w}{R})^2)$ は、浅水方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(uh)}{\partial x}=0\,,\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial h}{\partial x}=0$$

ここで，h ：水深（m）,H ：水位（m），u ：流速(m/s)

でいろいろなパターンの解析を行い、その結果を表現する式を導きだしたものである。解析は勾配 1/50 程度の登り一定勾配の地形に対して行なっている(注 1)。ダムブレーク解析は平坦地形を仮定しており、登り勾配を考慮していないので、そのために FEMA 式による流体力は小さくなったと考えられる。

注 1) Yeh, H., 2006, Maximum Fluid Forces in the Tsunami Runup Zone, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, ASME, Vol132, pp.496

８．高圧ガス設備を対象とした補正の検討

（１）対象物を超える高さの津波に対する補正

FEMA 式が適用できるケースは、水深が構造物高さ以下の場合を仮定しており、断面補正する必要がある。

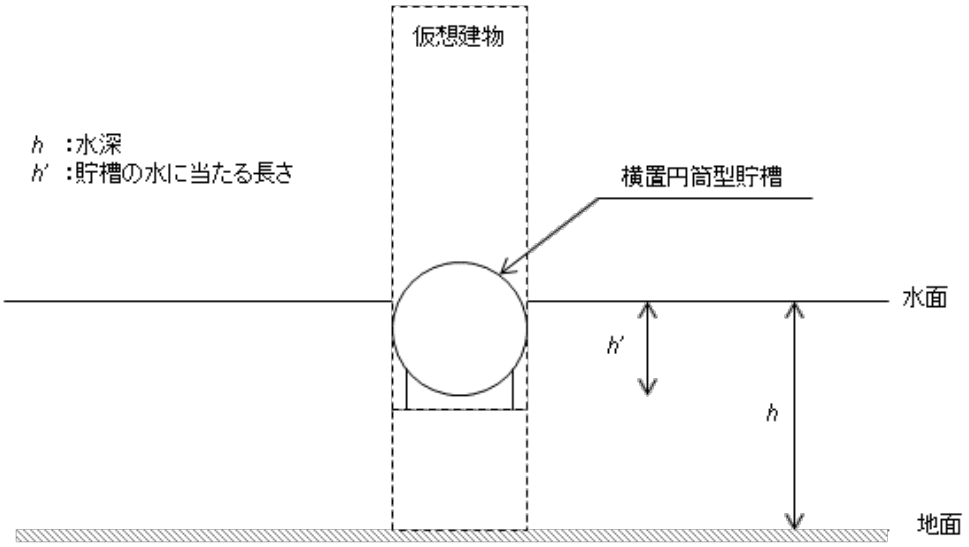


図 5.8-1　断面補正の説明

（上図の水深の場合、貯槽の下の脚の部分に働く荷重も含んだことになる）

考えられる断面補正係数は

$c_s = \dfrac{h'}{h}$　　ここで、h ：浸水深，h' ：貯槽の水が当たる長さ

（２）　貯槽が完全には浸水しない場合の横置円筒貯槽の浮力

浮力は水面下に占める空隙（または密度差のある物質が占める体積）に依存する。貯槽が完全には浸水しない場合、この体積が変化するので、これを考慮して計算する。

$0 \le d < R$ のとき

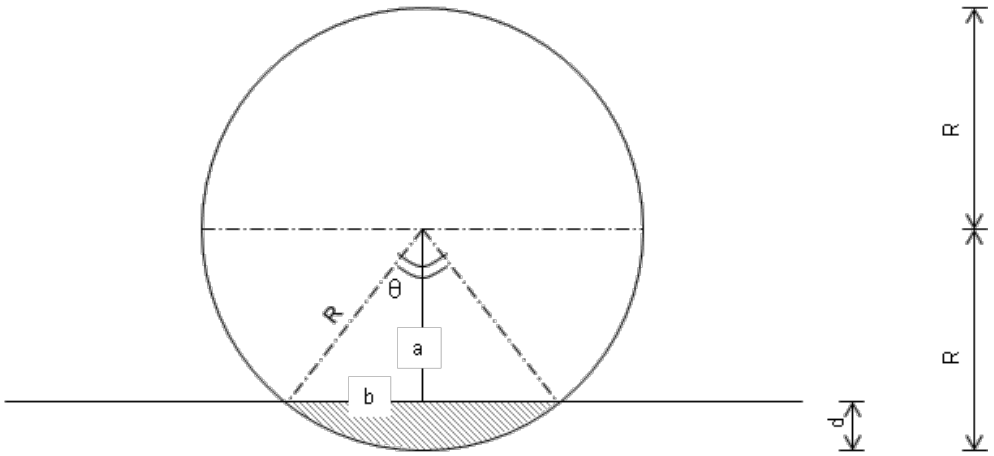


図 5.8-2

$a = R - d$ ，$\theta = 2 \cdot \cos^{-1} \dfrac{a}{R}$ とすると

$$S = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\theta}{2\pi} - a \times b \times 2 = (\frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \theta - R \cdot \cos\frac{\theta}{2} \times R \cdot \sin\frac{\theta}{2} \times 2)$$

$$= (\frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \theta - 2 \cdot R^2 \cdot \cos\frac{\theta}{2} \cdot \sin\frac{\theta}{2}) = (\frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \theta - R^2 \cdot \sin\theta)$$

$$= (\frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \theta - \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \sin\theta) = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta)$$

したがって、

$$V = B \cdot S = B \cdot \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta)$$

$R \le d \le 2R$ のとき

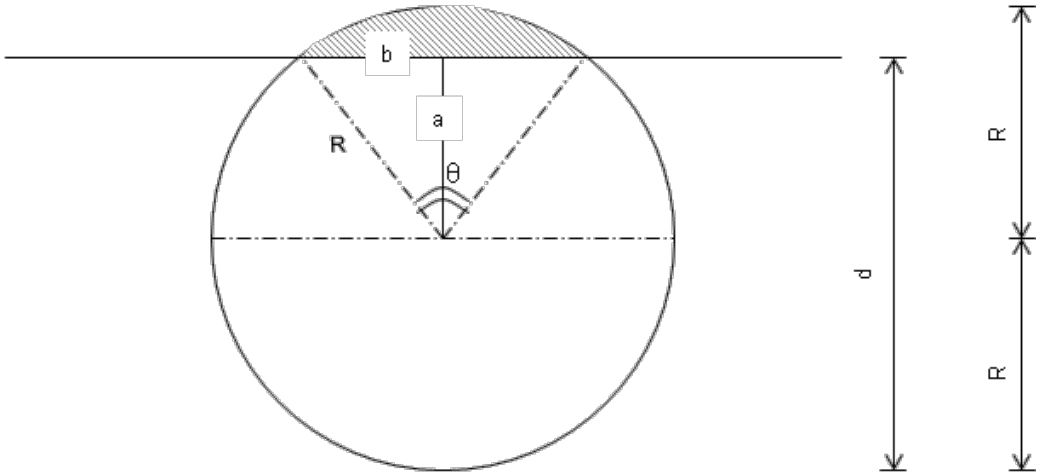


図 5.8-3

$a = d - R$，$\theta = 2 \cdot \cos^{-1} \dfrac{a}{R}$ とすると

$$S = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta)$$

したがって、

$$V = B \cdot S = B \cdot \pi R^2 - B \cdot \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta)$$

したがって

$0 \le d < R$ のとき　　$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V = \rho_s \cdot g \cdot B \cdot \dfrac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta)$

$R \le d \le 2R$ のとき　　$F_b = \rho_s \cdot g \cdot V = \rho_s \cdot g \cdot [B \cdot \pi R^2 - B \cdot \dfrac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta)]$

ここで、

F_b ：浮力（N），ρ_s ：浮遊物を考慮した氾濫水の密度（$1200 kg/m^3$）

g ：重力加速度（$9.8 m/s^2$）、B ：円筒貯槽の全長（m）、R ：円筒貯槽断面の半径（m）

これを、計算対象モデルに適用すると、下図のようになる。

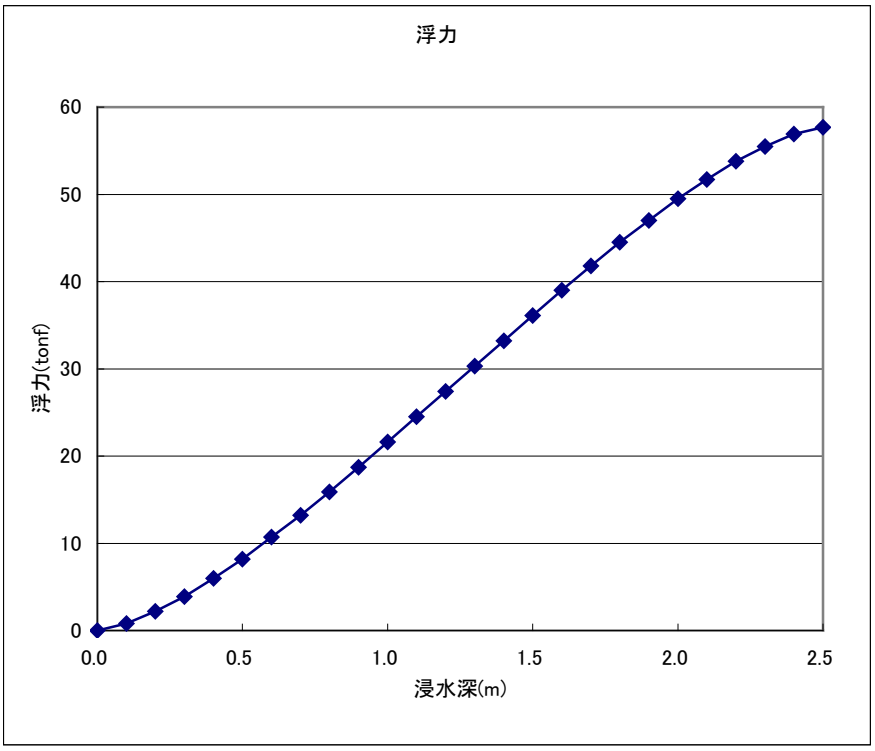


図 5.8-4

９．FEMA 式の補正を考慮した計算

本計算では、前記の計算例と同じモデルを 1.5m カサ上げされている場合を考える。
更に、補正係数 C s および貯槽が完全に浸水しない場合の浮力も適用する。

（１）荷重計算

浸水深は２．５メートル、５．０メートル、１０メートル、３０メートルを計算。浸水深＋貯槽下端の標高とする。なお、遡上高の１．３倍は行なわず $R = R^*$ とする。２．５ｍの浮力、流体力、衝撃力、以外は、４．に同じ。

(ア)静水力

なし

(イ)水深 2.5m の浮力

貯槽下端が地面より 1.5m カサ上げされているので、貯槽が沈む水深は 2.5m-1.5m=1.0m これは、半径 1.25m より小さい。したがって、

$$a = 1.25m - 1.0m = 0.25m,\ \theta = 2 \cdot \cos^{-1}\frac{0.25}{1.25} = 2.738$$

$$F_b = \rho_s \cdot g \cdot B \cdot \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot (\theta - \sin\theta) = 1200 \cdot 9.8 \cdot 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25^2 \cdot (2.738 - \sin 2.738)$$

$$= 91875 \times (2.738 - 0.392) = 215000N = 22tonf$$

これより、本体重量 9ton を引いて、13ton

(ウ)浸水深 5.0m, 10.0m, 30.0m の浮力

浸水深 5.0m, 10.0m, 30.0m は貯槽を完全に浸水させるので、すべて同じ値で、計算は以下のより。

貯槽の体積は $V = \pi \cdot r^2 \cdot L = 3.14 * 1.25^2 * 10 = 49m^3$

これより、空の場合 $F_b = \rho_s \cdot g \cdot V = 1200 \times 9.8 \times 49 \approx 5.8 \times 10^5 (N) \approx 58tonf$

本体重量９トンを引くことにより、 $F_b = 49tonf$

（エ）流体力

仮想建物にかかる流体力は

水深 2.5m $F_d' = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max} = \frac{1}{2}\times 1200\times 2\times 10\times 9 = 1.08\times 10^5\, N \approx 11 tonf$

水深 5.0m $F_d' = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max} = \frac{1}{2}\times 1200\times 2\times 10\times 34 = 4.08\times 10^5\, N \approx 41 tonf$

水深 10.0m $F_d' = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max} = \frac{1}{2}\times 1200\times 2\times 10\times 128 = 1.536\times 10^6\, N \approx 154 tonf$

水深 30.0m $F_d' = \frac{1}{2}\rho_s C_d B(hu^2)_{\max} = \frac{1}{2}\times 1200\times 2\times 10\times 1120 = 1.344\times 10^7\, N \approx 1344 tonf$

断面補正係数は

水深 2.5m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{(2.5m - 1.5m)}{2.5m} = 0.4$

水深 5.0m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{5.0m} = 0.5$

水深 10.0m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{10m} = 0.25$

水深 30.0m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{30m} = 0.08$

したがって、貯槽にかかる流体力は

水深 2.5m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.4\times 11 tonf = 4 tonf$

水深 5.0m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.5\times 41 tonf = 20 tonf$

水深 10.0m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.25\times 154 tonf = 38 tonf$

水深 30.0m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.08\times 1344 tonf = 107 tonf$

（オ）衝撃力

衝撃力は流体力の１．５倍であるので、下表の通りとなる。

表 5.9-1

水深 (m)	流体力-FEMA N ($tonf$)	衝撃力 N ($tonf$)
2.5	0.4×10^5 (4)	0.6×10^5 (6)
5.0	2.0×10^5 (20)	3.0×10^5 (30)
10.0	3.8×10^5 (38)	5.7×10^5 (57)
30.0	10.7×10^5 (107)	16×10^5 (160)

（カ）浮遊物の衝突力

$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m}$　ここで、F_i：衝撃 力（N），C_m：付加質量定数(無単位，推奨値2.0)、

$u_{\max}$：最大流速（m/s），k：有効剛性（N/m），m：浮遊物の質量（kg）

450kg の流木が衝突したことを仮定する。

FEMA-P646,Table6-1 よりこれの有効剛性は$2.4\times10^6\ N/m$。これより、

水深　2.5m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0\times7\times\sqrt{2.4\times10^6\times450} \approx 4.6\times10^5\ N \approx 46tonf$

水深　5.0m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0\times10\times\sqrt{2.4\times10^6\times450} \approx 6.6\times10^5\ N \approx 66tonf$

水深　10.0m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0\times14\times\sqrt{2.4\times10^6\times450} \approx 9.2\times10^5\ N \approx 92tonf$

水深　30.0m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0\times24\times\sqrt{2.4\times10^6\times450} \approx 1.58\times10^6\ N \approx 158tonf$

（2）荷重計算まとめ

表 5.9-2

水深 （*m*）	静水力 N （*tonf*）	浮力(空) N （*tonf*）	流体力 -FEMA N （*tonf*）	衝撃力 -FEMA N （*tonf*）	衝突力 N （*tonf*）
2.5	0	1.3×10^5 (13)	0.4×10^5 (4)	0.6×10^5 (6)	4.6×10^5 (46)
5.0	0	4.9×10^5 (49)	2.0×10^5 (20)	3×10^5 (30)	6.6×10^5 (66)
10.0	0	4.9×10^5 (49)	3.8×10^5 (38)	5.7×10^5 (57)	9.2×10^5 (92)
30.0	0	4.9×10^5 (49)	10.7×10^5 (107)	16×10^5 (160)	15.8×10^5 (158)

表 5.9-3（参考：ダムブレーク解析式による hu^2 を使用した場合）

水深 （*m*）	静水力 N （*tonf*）	浮力(空) N （*tonf*）	流体力 -ダムブレーク N （*tonf*）	衝撃力 -ダムブレーク N （*tonf*）	衝突力 N （*tonf*）
2.5	0	1.3×10^5 (13)	0.7×10^5 (7)	1.0×10^5 (10)	4.6×10^5 (46)
5.0	0	4.9×10^5 (49)	3.6×10^5 (36)	5.4×10^5 (54)	6.6×10^5 (66)
10.0	0	4.9×10^5 (49)	7.3×10^5 (73)	10.9×10^5 (109)	9.2×10^5 (92)
30.0	0	4.9×10^5 (49)	21.1×10^5 (211)	31.6×10^5 (316)	15.8×10^5 (158)

１０　実在した貯槽の諸元に基づいた計算

東日本大震災で被災した横置き形円筒貯槽の諸元を参考にして FEMA-P646 で津波荷重の計算を試算した。

（参考データ）

- 事業所所在地　　岩手県宮古市
- 高圧ガスの種類　　プロパン
- 事業所位置の標高　　約 2m
- 貯蔵能力　　20 トン(重量で約20×10^4ニュートン)
- 容積　　47 立方メートル
- 全長　　約 10 メートル（10,134mm）
- 直径　　2.5m(2,500mm)
- 本体重量　　11.0 重量トン(約11×10^4ニュートン)
- 地上から基礎上面までの高さ　　約 1.5m
- 地上から貯槽下端までの高さ　　約 1.6m
- 流出時貯蔵量　　約 16 トン(重量で約16×10^4ニュートン)
- 海岸から距離　　約 0.7km
- 貯槽・長軸方向の方位　北西-南東
- 津波高さ　　約 8.5m
- 津波遡上高　　約 10m

（本貯槽は東北大震災津波で流出し、現在は存在しない。）

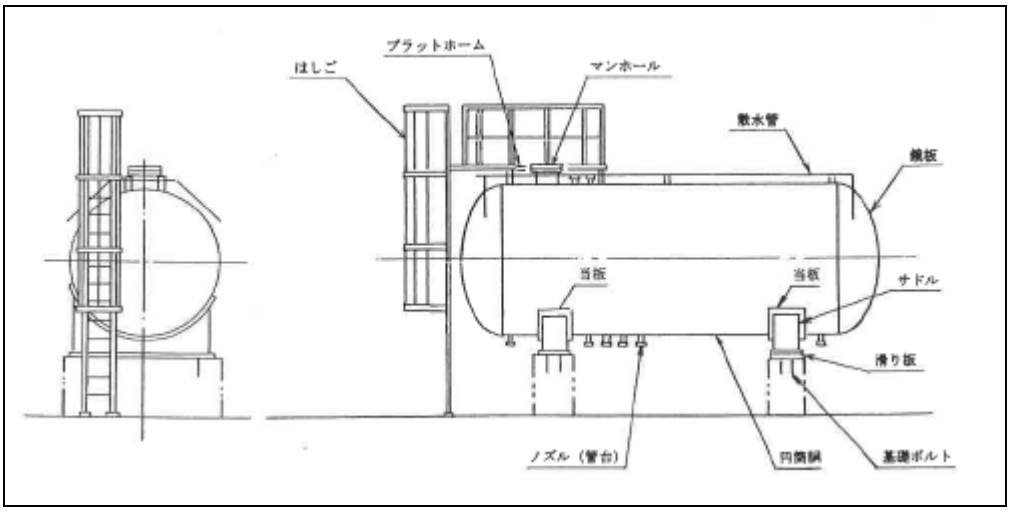


図 5.10-2　貯槽概形図

（荷重計算）

津波力を計算する最大浸水深は 2.5m, 5.0m, 8.5m, 10m, 30m とする。計算用遡上高は、(最大浸水深)＋(貯槽位置の標高)とする。数値シミュレーションから得られた遡上高(R^*)はRの$\frac{1}{1.3}$を仮定する。これより、計算用遡上高、最大流速、$(h\cdot u^2)_{\max}$は下表のようになる。

表 5.10-1　最大浸水深、最大流速、$(h\cdot u^2)_{\max}$の計算値

最大浸水深(m)	計算用遡上高 (m)	流速(m/s) カッコ内$(km/hour)$	$(hu^2)_{\max}$ (m^3/s^2)
2.5	4.5	7.0(25)	8.4
5.0	7.0	9.9(36)	32.1
8.5	10.5	12.9(46)	91.0
10.0	12.0	14.0(50)	125.4
30.0	32.0	24.2(87)	1111.3

(ア)静水力

なし

(イ)水深 2.5m の浮力

水深 2.5m の場合、貯槽は完全には浸水しない。貯槽下端が地面より 1.6m 上にあるので、貯槽が沈む水深は 2.5m-1.6m=0.9m である。

これは、半径 1.25m より小さい。したがって、

$$a=1.25m-0.9m=0.35m,\ \theta=2\cdot\cos^{-1}\frac{0.35}{1.25}=2.574$$

$$F_b=\rho_s\cdot g\cdot B\cdot\frac{1}{2}\cdot R^2\cdot(\theta-\sin\theta)=1200\cdot9.8\cdot10\cdot\frac{1}{2}\cdot1.25^2\cdot(2.574-\sin 2.574)$$

$$=91875\times(2.574-0.537)=187000N\approx19\times10^4N$$

これより、本体重量11×10^4Nを引いて、8×10^4N

(ウ)浸水深 5.0m, 8.5m, 10.0m, 30.0m の浮力

浸水深 5.0m, 10.0m, 30.0m は貯槽を完全に浸水させるので、すべて同じ値で、計算は以下のより。

貯槽の体積は$V=\pi\cdot r^2\cdot L=3.14*1.25^2*10=49m^3$

これより、空の場合 $F_b = \rho_s \cdot g \cdot V = 1200 \times 9.8 \times 49 \approx 5.8 \times 10^5 (N) = 58 \times 10^4 (N)$

本体重量 $11 \times 10^4 N$ を引くことにより、 $F_b = 47 \times 10^4 N$

（エ）流体力

仮想建物にかかる流体力は

水深 2.5m $F_d' = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} = \frac{1}{2} \times 1200 \times 2 \times 10 \times 8.4 \approx 10 \times 10^4 N$

水深 5.0m $F_d' = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} = \frac{1}{2} \times 1200 \times 2 \times 10 \times 32.1 \approx 39 \times 10^4 N$

水深 8.5m $F_d' = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} = \frac{1}{2} \times 1200 \times 2 \times 10 \times 91.0 \approx 109 \times 10^4 N$

水深 10.0m $F_d' = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} = \frac{1}{2} \times 1200 \times 2 \times 10 \times 125.4 \approx 151 \times 10^4 N$

水深 30.0m $F_d' = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} = \frac{1}{2} \times 1200 \times 2 \times 10 \times 1111.3 \approx 1334 \times 10^4 N$

断面補正係数は

水深 2.5m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{(2.5m - 1.6m)}{2.5m} = 0.360$

水深 5.0m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{5.0m} = 0.500$

水深 8.5m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{8.5m} = 0.294$

水深 10.0m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{10m} = 0.250$

水深 30.0m $C_s = \frac{h'}{h} = \frac{2.5m}{30m} = 0.083$

したがって、貯槽にかかる流体力は

水深 2.5m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.360 \times 10 \times 10^4 N \approx 3.6 \times 10^4 N$

水深 5.0m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.500 \times 39 \times 10^4 N \approx 19 \times 10^4 N$

水深 8.5m $F_d = C_s \cdot F_d' = 0.294 \times 109 \times 10^4 N \approx 32 \times 10^4 N$

水深 10.0m　$F_d = C_s \cdot F_d' = 0.250 \times 151 \times 10^4 N \approx 38 \times 10^4 N$

水深 30.0m　$F_d = C_s \cdot F_d' = 0.083 \times 1334 \times 10^4 N \approx 111 \times 10^4 N$

（オ）衝撃力

衝撃力は流体力の１．５倍であるので、下表の通りとなる。

表 5.10-2　衝撃力の計算値

水深 (m)	流体力-FEMA $(\times 10^4 N)$	衝撃力 $(\times 10^4 N)$
2.5	3.6	5
5.0	19	29
8.5	32	48
10.0	38	56
30.0	111	167

（カ）浮遊物の衝突力

450kg の流木が衝突したことを仮定する。FEMA-P646,Table6-1 よりこれの有効剛性は $2.4 \times 10^6 N/m$、質量 $450kg$。これより、

水深　2.5m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0 \times 7.0 \times \sqrt{2.4 \times 10^6 \times 450} \approx 46 \times 10^4 N$

水深　5.0m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0 \times 9.9 \times \sqrt{2.4 \times 10^6 \times 450} \approx 65 \times 10^4 N$

水深　8.5m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0 \times 12.9 \times \sqrt{2.4 \times 10^6 \times 450} \approx 85 \times 10^4 N$

水深　10.0m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0 \times 14.0 \times \sqrt{2.4 \times 10^6 \times 450} \approx 92 \times 10^4 N$

水深　30.0m　$F_i = C_m \cdot u_{\max} \sqrt{k \cdot m} = 2.0 \times 24.2 \times \sqrt{2.4 \times 10^6 \times 450} \approx 159 \times 10^4 N$

（キ）計算まとめ

表 5.10-3　荷重計算まとめ

水深（m）	静水力（$\times 10^4 N$）	浮力(空)（$\times 10^4 N$）	流体力 -FEMA（$\times 10^4 N$）	衝撃力 -FEMA（$\times 10^4 N$）	衝突力（$\times 10^4 N$）
2.5	0	8	4	5	46
5.0	0	47	19	29	65
8.5	0	47	32	48	85
10.0	0	47	38	56	92
30.0	0	47	111	167	159

表 5.10-4 ダムブレーク解析解の最大流速と $(h \cdot u^2)_{max}$ を使った荷重計算

水深（m）	静水力（$\times 10^4 N$）	浮力(空)（$\times 10^4 N$）	流体力 -DAM（$\times 10^4 N$）	衝撃力 -DAM（$\times 10^4 N$）	衝突力（$\times 10^4 N$）
2.5	0	8	7	10	51
5.0	0	47	37	55	64
8.5	0	47	62	94	88
10.0	0	47	73	110	96
30.0	0	47	220	331	179

表 5.10-5　$(h \cdot u^2)_{max}$ の FEMA 式とダムブレーク解析解の比較

水深（m）	① $(h \cdot u^2)_{max}$ -FEMA（m^3/s^2）	② $(h \cdot u^2)_{max}$ -ダムブレーク（m^3/s^2）	②/①
2.5	8	15	1.9
5.0	32	61	1.9
8.5	91	177	1.9
10.0	125	244	2.0
30.0	1111	2204	2.0

（ク）津波力の重ね合わせ

最大浸水深 8.5m の津波力に対して、津波力の重ね合わせを行なう。垂直方向の津波力は、表 5.10-3 より $47\times10^4\,N$。水平方向の津波力は表 5.10-2 により、下表のごとく。

表 5.10-6 水平方向津波力の時系列

時刻	作用する津波力	荷重値($\times10^4\,N$)	備考
1	衝撃力	48	
2	流体力	32	
3	流体力+衝突力	32+85=117	水平方向津波力として採用

これより垂直及び水平方向津波力は以下のとおり。

表 5.10-7 垂直及び水平方向津波力

津波力の方向	荷重値($\times10^4\,N$)
垂直(上向き)	47
水平	117

上表の垂直方向の津波力 $47\times10^4\,N$ は、浮力 $58\times10^4\,N$ から本体重量 $11\times10^4\,N$ を引いたものである。４．１１章の方法で垂直方向の津波力から垂直方向の津波荷重を求めると、

上向き津波荷重=$0.9\times(-11\times10^4\,N)+1.0\times(58\times10^4\,N)=48.1\times10^4\,N\approx48\times10^4\,N$

となる。したがって、津波荷重は次の通り。

表 5.10-8 垂直及び水平方向津波荷重

荷重の方向	荷重値($\times10^4\,N$)
垂直(上向き)	48
水平	117

（ケ）横置円筒形貯槽の津波に対するボルト強度の比較

最大浸水深 8.5m の津波による宮古・横置円筒形貯槽の津波力、津波荷重を計算した。この貯槽はコンクリート製基礎の上に設置されていた。貯槽はサドルに溶接されており、サドルは基礎に基礎ボルトで固定されていた。このボルトが最大浸水深 8.5m の津波力により、破壊されるかどうか比較を行なった。比較項目を以下に示す。

(1) 浮力によりボルトに働く引張力

(2) 横方向の津波力によりボルトに働くせん断力

(3) 基礎上面の下流側ボルト位置を原点とした津波力のモーメントにより上流側ボルトに働くモーメント

（計算諸元）

（１）ボルトの本数　４本

（２）ボルトの材質　SS400

（３）ボルトの径　　W1-1/4

（４）貯槽の本体重量 $11\times10^4\,N$ (11 トン)。これより垂直上向き荷重(浮力)は

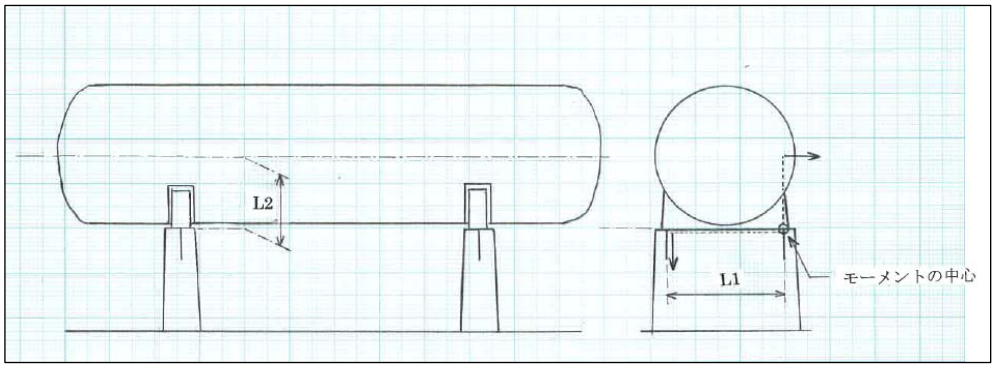
$0.9\times(-11\times10^4\,N)+1.0\times(58\times10^4\,N)=48.1\times10^4\,N\approx48\times10^4\,N$　となる。

（５）津波力、津波荷重

表 5.10-9 津波外力

名称	力の大きさ $\times10^4\,N$	出所
上向き垂直荷重(浮力)	48	上記（４）
流体力	32	表 5-9.3
衝撃力	48	表 5-9.3
浮遊物の衝突力	85	表 5-9.3
水平方向津波荷重	117	表 7-1.3

（６）曲げモーメントを計算する上で必要となる構造物の寸法



L1: 2.2m, L2: 1.39m

図 5.10-3　曲げモーメントを計算する上で必要となる構造物の寸法

（計算条件）

基礎ボルトが破断する際の引張強さ（最小引張強さ）、せん断強さ及びボルト径を次のとおり仮定する。

- SS400 の引張強さは JIS G3101 より $400N/mm^2$ とした。
- SS400 のせん断強さは $400N/mm^2$ の 60%、$240N/mm^2$ とした。
- ボルトの径　W1-1/4 （おねじの谷の径 $27.10mm$　断面積 $576mm^2$ ）とした。

（計算）

⑴鉛直上向き荷重(浮力)

引張強さ　$400N/mm^2 \times 576mm^2 \times 4本 = 92 \times 10^4 N$

津波荷重　$48 \times 10^4 N$

⑵最大流体力

せん断力　$240N/mm^2 \times 576mm^2 \times 4本 = 55 \times 10^4 N$

最大流体力　$32 \times 10^4 N$

⑶衝撃力

せん断力　$240N/mm^2 \times 576mm^2 \times 4本 = 55 \times 10^4 N$

最大衝撃力　$48 \times 10^4 N$

⑷浮遊物の衝突力

せん断力　$240N/mm^2 \times 576mm^2 \times 4本 = 55 \times 10^4 N$

浮遊物の衝突力　$85 \times 10^4 N$

⑸浮遊物の衝突力と最大流体力の和

せん断力　$240N/mm^2 \times 576mm^2 \times 4本 = 55 \times 10^4 N$

浮遊物の衝突力と流体力の和　$117 \times 10^4 N$

⑹最大流体力による曲げモーメント

曲げモーメント　$400N/mm^2 \times 576mm^2 \times 2.2m \times 2本 \approx 101 \times 10^4 N \cdot m$

作用曲げモーメント　$32 \times 10^4 N \times 1.39m \approx 44 \times 10^4 N \cdot m$

⑺衝撃力による曲げモーメント

曲げモーメント　$400N/mm^2 \times 576mm^2 \times 2.2m \times 2本 \approx 101 \times 10^4 N \cdot m$

作用曲げモーメント　$48\times10^4\,N\times1.36m\approx65\times10^4\,N\cdot m$

(8) 浮遊物の衝突力による曲げモーメント

曲げモーメント　$400N/mm^2\times576mm^2\times2.2m\times2本\approx101\times10^4\,N\cdot m$

作用曲げモーメント　$85\times10^4\,N\times1.36m\approx116\times10^4\,N\cdot m$

(9) 浮遊物の衝突力と最大流体力の和による曲げモーメント

曲げモーメント　$400N/mm^2\times576mm^2\times2.2m\times2本\approx101\times10^4\,N\cdot m$

作用曲げモーメント　$117\times10^4\,N\times1.36m\approx159\times10^4\,N\cdot m$

（コ）計算のまとめ（ボルトの本数４本）

表 5.10-10　ボルト４本のときの安全性(浮力およびせん断力)

	津波外力の種類	許容値 ($\times10^4\,N$)	作用値 ($\times10^4\,N$)	判定
1	鉛直上向き荷重(浮力)	92	48	○
2	最大流体力	55	32	○
3	衝撃力	55	48	○
4	浮遊物の衝突力	55	85	×
5	浮遊物の衝突力と最大流体力の和	55	117	×

表 5.10-11 ボルト４本のときの安全性(モーメント)

	津波外力の種類	許容値 ($\times10^4\,N\cdot m$)	作用値 ($\times10^4\,N\cdot m$)	判定
6	最大流体力によるモーメント	101	44	○
7	衝撃力によるモーメント	101	65	○
8	浮遊物の衝突力によるモーメント	101	116	×
9	浮遊物の衝突力と最大流体力の和によるモーメント	101	159	×

（サ）　ボルトの本数を８本とした場合

更に、ボルトの本数を８本に増やして計算してみた結果を以下に示す。

表-5.10-12　ボルト８本のときの安全性(浮力およびせん断力)

	津波外力の種類	許容値 $(\times 10^4 N)$	作用値 $(\times 10^4 N)$	判定
1	鉛直上向き荷重(浮力)	184	48	○
2	最大流体力	110	32	○
3	衝撃力	110	48	○
4	浮遊物の衝突力	110	85	○
5	浮遊物の衝突力と最大流体力の和	110	117	×

表-5.10-13　ボルト８本のときの安全性(モーメント)

	津波外力の種類	許容値 $(\times 10^4 N \cdot m)$	作用値 $(\times 10^4 N \cdot m)$	判定
6	最大流体力によるモーメント	202	44	○
7	衝撃力によるモーメント	202	65	○
8	浮遊物の衝突力によるモーメント	202	116	○
9	浮遊物の衝突力と最大流体力の和によるモーメント	202	159	○

１１．　考察

（１）　静水力は構造物の壁に対して一方だけから力が加わった場合のことを想定しており、高圧ガス設備が完全に浸水した場合は静水力は働かない。

（２）　浮力は、貯槽本体が完全に冠水した場合、計算値は水深に無関係である。

（３）　横置円筒貯槽が不完全浸水した場合、その変化は浸水深にほぼ比例する。

（４）　FEMA の流速近似式で流速を求め、これを $(h\cdot u^2)_{\max}$ に代入して流体力を求めてはいけない。

（５）　FEMA の流速近似式は、$u_{\max}=\sqrt{2\cdot g\cdot R\cdot(1-\frac{z}{R})}$ はである。これは一定勾配地形の遡上解析結果をもとに導き出されたものである。したがって、$R\cdot(1-\frac{z}{R})=R-z$ から、下図のように、遡上高を初期水深とし、間の水深を(遡上高- 標高)で求めている。したがって、本式は $u_{\max}=\sqrt{2\cdot g\cdot h}$ と等価である。

参考文献) Yeh, H., 2006, Maximum Fluid Forces in the Tsunami Runup Zone, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, ASME, Vol132, pp.496

（６）　ダムブレーク解析式を解いたときの最大流速と FEMA 流速推定式からもとめた流速がよく一致した。また、ダムブレーク解析において $h\cdot u^2$ を出力させたところ、最大流速位置より大きく上流にあることがわかった。

（７）　FEMA-P646 において、浮遊物の衝突力を計算に必要な入力データは、有効剛性と質量である。有効剛性は、

$k=\frac{F}{\delta}$　ここで、k ：有効剛性、F ：外力、δ ：外力による変形量

で定義されるが、これは材料とその物体の形状に依存する。したがって、それぞれの物体で特有の値を持ち、衝突物の有効剛性値をどのように入手するか、課題になると思われる。

◆まとめ

FEMA 式に基づいて横置円筒形貯槽に作用する津波荷重を試算した。計算結果と別の解析式（ダムブレーク解析）の結果とを比較した場合、FEMA 式による計算結果の方が値は小さく出た。それは FEMA 式に提示されている hu^2 の推定式の結果の違いが原因であった。いずれの推定式が高圧ガス設備の評価に適正であるかについての検討は、今後の課題であると考えられる。

また、FEMA 式では建物を対象としているため、浸水深が建物を超える場合は適用できないが、補正係数を導入することにより高圧ガス設備が完全に浸水した場合でも適用できるが可能性があると考えられる。